

**IDENTIFIKASI POLA SEBARAN AIR PANAS MENGGUNAKAN
METODE RESISTIVITAS DAN GEORADAR DI DAERAH
GUNUNG PANDAN JAWA TIMUR**

TESIS

**Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Magister Sains Dalam Bidang Fisika**



Oleh:

**ORIENSI Y. K. TEFTAE
176090300111011**

**PROGRAM STUDI ILMU FISIKA
MINAT GEOFISIKA**

**PROGRAM PASCASARJANA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

MALANG

2019



TESIS

**IDENTIFIKASI POLA SEBARAN AIR PANAS MENGGUNAKAN
METODE RESISTIVITAS DAN GEORADAR DI DAERAH
GUNUNG PANDAN JAWA TIMUR**

Oleh:

Oriensi Y. K. Teftae
176090300111011

Telah dipertahankan didepan penguji
pada tanggal 13 Juni 2019
dan dinyatakan LULUS

Menyetujui,
Komisi Pembimbing

Ketua

Anggota

Sukir Maryanto, Ph. D
NIP. 197106211998021001

Dr. Eng Didik R. Santoso, M. Si
NIP. 196906101994021001

Mengetahui
Ketua Program Studi S2 Fisika

Mauludi Ariesto Pamungkas, Ph. D
NIP. 197304122000031013

IDENTITAS TIM PENGUJI

Judul:

**IDENTIFIKASI POLA SEBARAN AIR PANAS MENGGUNAKAN
METODE RESISTIVITAS DAN GEORADAR DI DAERAH GUNUNG
PANDAN JAWA TIMUR**

Nama Mahasiswa : Oriensi Y. K. Teftae

NIM : 176090300111011

Program Studi : S2 Ilmu Fisika

Minat : Geofisika

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Sukir Maryanto, Ph. D

Anggota : Dr. Eng. Didik R. Santoso, M. Si

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Wiyono, M. Si

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Agus Naba, S. Si. M. T

Tanggal Ujian : 13 Juni 2019

SK Penguji :



PERNYATAAN ORISINALITIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, didalam 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, atau yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan (plagiat), saya bersedia tesis (Magister) dibatalkan serta diproses sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Malang, 13 Juni 2019

Oriensi Y. K. Teftae
NIM. 176090300111011

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Oriensi Y. K. Teftae dilahirkan di Niki-Niki pada tanggal 31 Oktober 1983. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Elias Teftae dan Johana Nubatonis. Penulis menempuh Pendidikan Sekolah Dasar di SDI Besakolka dan lulus pada tahun 1996. Kemudian, Penulis melanjutkan Pendidikan Menengah Pertama di SMPN 1 Amanuban Tengah dan lulus pada tahun 1999. Pendidikan Menengah Atas ditempuh Penulis di SMAN 1 Amanuban Tengah dan lulus tahun 2002. Penulis melanjutkan pendidikan S1 di Universitas Nusa Cendana Kupang jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknik pada tahun 2002 dan lulus pada tahun 2007. Pada tahun 2017 penulis melanjutkan pendidikan S2 pada program studi Ilmu Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang.

Malang, 13 Juni 2019

Penulis

IDENTIFIKASI POLA SEBARAN AIR PANAS MENGGUNAKAN METODE RESISTIVITAS DAN GEORADAR DI DAERAH GUNUNG PANDAN JAWA TIMUR

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian menggunakan metode resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan, Jawa Timur, Indonesia, untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan berdasarkan interpretasi 3D dan menentukan pola sebaran air panas. Akuisisi data resistivitas dilakukan pada 16 titik VES (*Vertical Electrical Sounding*) dengan desain penelitian berbentuk grid melingkupi manifestasi mataair panas, sedangkan akuisisi data georadar dilakukan scanning pada 4 zona manifestasi mataair panas yang berada dalam area akuisisi data resistivitas. Hasil interpretasi 3D struktur bawah permukaan berdasarkan data resistivitas di daerah gunung Pandan menunjukkan rentang nilai dari 1,06-20064,09 Ωm , berada pada kedalaman 0,58-147 m. Terdapat 4 lapisan batuan yaitu:

- Lapisan batuan dengan nilai resistivitas $<20 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai lapisan yang mengandung air panas diduga merupakan batuan lempung pasir (*clay sand*). Lapisan yang mengandung air panas berada dekat permukaan hingga kedalaman 114 m.
- Lapisan batuan dengan nilai resistivitas antara 20,01-50,00 Ωm diinterpretasikan sebagai lapisan kedap air diduga merupakan batuan tuff.
- Lapisan batuan dengan nilai resistivitas antara 50,01-100 Ωm diinterpretasikan sebagai lapisan penyimpanan air (*akuifer*) diduga merupakan batu pasir (*sandstone*).
- Lapisan batuan dengan nilai resistivitas $>100,01 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai lapisan sumber panas (*source*) diduga merupakan breksi gunungapi.

Hasil interpretasi 3D struktur bawah permukaan berdasarkan hasil perekaman GPR menunjukkan adanya lapisan rongga (*cavity*) diduga sebagai lapisan yang mengandung air panas tersebar pada semua line profil berada dekat permukaan hingga kedalaman 0,07-16,88 m. Pola sebaran air panas berdasarkan data resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan bersifat mengelompok dan menyebar. Pola sebarannya berasal dari barat daya-timur laut.

Kata Kunci: Air panas, gunung Pandan, geolistrik resistivitas, georadar, VES, scanning.

IDENTIFICATION OF HOT WATER DISTRIBUTION PATTERNS USING RESISTIVITY AND GEORADAR METHODS IN THE AREA MOUNT PANDAN JAWA TIMUR

ABSTRACT

The research of identification hot water distribution has been done using resistivity and georadar methods in the geothermal area of mount Pandan, East Java, Indonesia, to identify subsurface structures based on 3D interpretations and hot water distribution patterns. Data acquisition was conducted at 16 points of VES (Vertical Electrical Sounding) with a grid research design covering hot water manifestations, whereas georadar data acquisition is carried out in 4 hot spring manifestation zones in the resistivity data acquisition area. The results of 3D interpretation of subsurface structures based on resistivity data in the Pandan mountain area show a range of values from 1,06-20064,09 Ωm , at a depth of 0.58-147 m. There are 4 rock layers, namely:

- a. The rock layer with a resistivity value of $<20 \Omega m$ is interpreted as a layer containing hot water which is thought to be a clay sand. The layer containing hot hot water is near the surface to a depth of 114 m.*
- b. The rock layer with resistivity values ranged from 20,01-50,00 Ωm is defined as a waterproof layer which is considered a tuff rock Gh*
- c. The rock layer with resistivity values ranged from 50,01-100,00 Ωm is defined as a layer of water storage (aquifer) which is considered sandstone.*
- d. Tthe rock layer with resistivity values is defined as a layer of heat source (heat transfer media) which is considered a volcanic breccia.*

The results of the 3D interpretation of subsurface structures based on GPR recording results show the existence of a cavity layer suspected as a layer containing hot water spread across all profile lines near the surface to a depth of 0.07-16.88 m. The pattern of distribution of hot water based on resistivity data and georadar in the Gunung Pandan area is clustered and spread. The distribution pattern comes from the southwest-northeast.

Keywords: *Hot water, mount Pandan, electrical resistivity, georadar, VES, Scanning.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa, karena atas berkat dan bimbinganNya maka penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik. Berbagai halangan dan rintangan penulis alami dalam rangka menyelesaikan tesis ini, namun berkat adanya bantuan dari berbagai pihak akhirnya tesis ini dapat diselesaikan. Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan tesis ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak, sehingga dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Sukir Maryanto, Ph. D, sebagai pembimbing utama yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan penulisan tesis ini.
2. Bapak Dr. Eng. Didik Rahadi Santoso, M. Si, sebagai pembimbing pendamping yang telah memberikan pengarahan dan masukan dalam penulisan tesis ini.
3. Kedua orangtuaku tercinta yang selalu memberi dukungan dalam studi.
4. Suami dan anak-anak yang selalu memberi dukungan, motivasi dan do'a dalam penulisan tesis.
5. Tim akuisisi data gunung Pandan (Rizal, Andre, Hazqi, Salman, Novi, Ayu, Laily, Selly, Wenti dan Irma).
6. Teman-teman pascasarjana ilmu fisika yang selalu membantu, memotivasi dan membagi ilmu pengetahuan.



Penulis menyadari bahwa tesis ini jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis mengharapkan sumbangan pikiran dari semua pihak yang bersifat konstruktif untuk menyempurnakan penulisan ini.

Malang, 13 Juni 2019

Penulis



DAFTAR ISI

Halaman

TESIS ii

IDENTITAS TIM PENGUJI iii

PERNYATAAN ORISINALITIS iv

RIWAYAT HIDUP v

ABSTRAK vi

KATA PENGANTAR viii

DAFTAR ISI x

DAFTAR TABEL xiii

DAFTAR GAMBAR xiv

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 4

1.3 Batasan Masalah 4

1.4 Tujuan Penelitian 5

1.5 Manfaat Penelitian 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1. Kondisi Geologi Umum Daerah Gunung Pandan 6

2.2. Panas Bumi 8

2.3. Metode Geofisika 12

2.3.1. Metode Geolistrik Resistivitas 13

2.3.2 Metode GPR 28

2.3 Penelitian Sebelumnya 31

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN 38



BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	41
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian	41
4.2 Peralatan Penelitian	41
4.3 Prosedur Penelitian	42
4.3.1 Akuisisi Data Penelitian	44
4.3.2 Prosedur Pengukuran	44
4.3.3 Pengolahan data	45
4.3.4 Interpretasi Data Penelitian	46
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	48
5.1 Hasil Pengolahan Data Penelitian	48
5.1.1 Hasil pengolahan data VES (<i>Vertical Electrical Sounding</i>)	52
5.1.2 Hasil Pengolahan data Georadar	69
5.2 Pembahasan	75
BAB VI PENUTUP	86
5.1 Kesimpulan	86
5.2 Saran	87
DAFTAR PUSTAKA	88
LAMPIRAN	94
L1: PUBLIKASI ILMIAH	94
L2.1 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 1	99
L2.2 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 2	100
L2.3 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 3	101
L2.4 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 4	102
L2.5 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 5	103

L2.6 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 6.....	104
L2.7 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 7.....	105
L2.8 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 8.....	106
L2.9 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 9.....	107
L2.10 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 10.....	108
L2.11 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 11.....	109
L2.12 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 12.....	110
L2.13 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 13.....	111
L2.14 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 14.....	112
L2.15 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 15.....	113
L2.16 Hasil Pengolahan Data Pada Titik VES 16.....	114
L3. Kedalaman Lapisan Cavity Dengan Metode Georadar.....	115
L4.1 Dokumentasi survey awal lokasi daerah gunung Pandan.....	116
L4.2 Dokumentasi Proses Akuisisi Data.....	117
L5 SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI.....	118

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 2 Manifestasi permukaan kompleks gunung Pandan.....	8
Tabel 2. 3 Kisaran nilai resistivitas batuan (Telford, 1976).....	27
Tabel 5. 1 Hasil Interpretasi Data VES 1.....	52
Tabel 5. 2 Hasil Interpretasi Data VES 2.....	53
Tabel 5. 3 Hasil Interpretasi Data VES 3.....	54
Tabel 5. 4 Hasil Interpretasi Data VES 4.....	55
Tabel 5. 5 Hasil Interpretasi Data VES 5.....	56
Tabel 5. 6 Hasil Interpretasi Data VES 6.....	57
Tabel 5. 7 Hasil Interpretasi Data VES 7.....	58
Tabel 5. 8 Hasil Interpretasi Data VES 8.....	59
Tabel 5. 9 Hasil Interpretasi Data VES 9.....	60
Tabel 5. 10 Hasil Interpretasi Data VES 10.....	61
Tabel 5. 11 Hasil Interpretasi Data VES 11.....	62
Tabel 5. 12 Hasil Interpretasi Data VES 12.....	63
Tabel 5. 13 Hasil Interpretasi Data VES 13.....	64
Tabel 5. 14 Hasil Interpretasi Data VES 14.....	65
Tabel 5. 15 Hasil Interpretasi Data VES 15.....	66
Tabel 5. 16 Hasil Interpretasi Data VES 16.....	66



DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Bojonegoro (Pringgoprawiro. 1992)..... 6

Gambar 2. 2 Skema sistem geothermal ideal (Dickson & Fanneli. 2004)..... 9

Gambar 2. 3 Model konveksi fluida pada sistem panas bumi (Dickson dan Mario. 2005)..... 10

Gambar 2. 4 Perpindahan elektroda secara sounding (Hamid. 2010)..... 14

Gambar 2. 5 Perpindahan elektroda secara mapping (Hamid. 2010) 15

Gambar 2.6 Penempatan elektroda pada pengukuran geolistrik resistivitas..... 16

Gambar 2. 7 Konsep resistivitas semu (*apparent resistivity*)..... 18

Gambar 2. 8 Titik arus dalam bumi homogen isotropis (Telford. 1976)..... 23

Gambar 2. 9 Ekuipotensial dan garis arus dari dua titik sumber arus di permukaan (Reynolds. 1997)..... 24

Gambar 2. 10 Dua elektroda arus dan elektroda potensial pada permukaan medium homogen isotropik (Telford. 1990)..... 25

Gambar 2. 11 Skema elektroda geolistrik konfigurasi Schlumberger 26

Gambar 2. 12 Pola sebaran air panas Blawan-Ijen (Suciningtyas. 2014) 32

Gambar 2. 13 Model geologi sumber air panas Cangar (Rakhmanto. 2011)..... 32

Gambar 2. 14 Hasil Interpretasi 3D data GPR pada line profil 1-35 (Santoso. 2012)..... 34

Gambar 2. 15 Analisis Data Geolistrik Resistivitas dan GPR (Santoso. 2012)..... 35

Gambar 2. 16 Air Panas Sinter tahun 1990, 2009 dan hasil GPR (Dougherty. 2015)..... 36

Gambar 3. 1 Kerangka Konsep Penelitian..... 40

Gambar 4. 1 Desain survei Penelitian 41

Gambar 4. 2 Prosedur penelitian..... 43

Gambar 5. 1 Interpolasi pemodelan 3D data resistivitas pada titik-titik VES 67

Gambar 5. 2 Hasil peta perekaman GPR pada zona 1 70

Gambar 5. 3 Hasil perekaman GPR pada zona 2 71

Gambar 5. 4 Hasil perekaman GPR pada zona 3 73

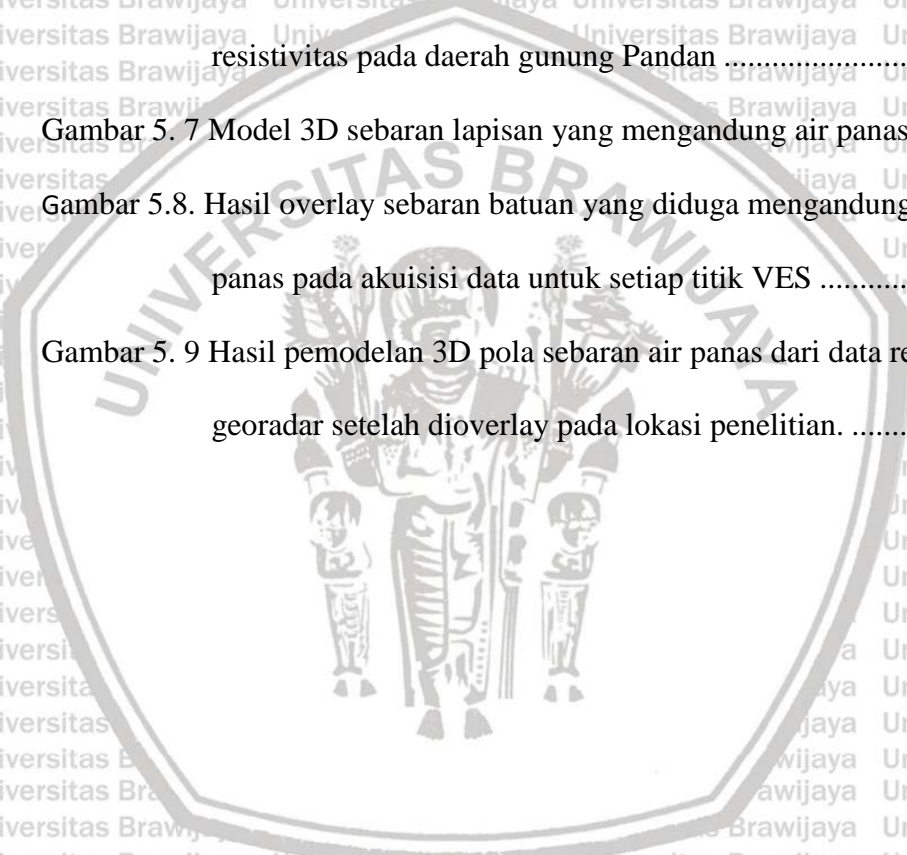
Gambar 5. 5 Hasil perekaman GPR pada zona 4 74

Gambar 5. 6 Model 3D kondisi bawah permukaan berdasarkan gabungan hasil resistivitas pada daerah gunung Pandan 78

Gambar 5. 7 Model 3D sebaran lapisan yang mengandung air panas 81

Gambar 5.8. Hasil overlay sebaran batuan yang diduga mengandung lapisan air panas pada akuisisi data untuk setiap titik VES 82

Gambar 5. 9 Hasil pemodelan 3D pola sebaran air panas dari data resistivitas dan georadar setelah dioverlay pada lokasi penelitian. 83



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi memiliki peran penting dalam kelangsungan hidup manusia, salah satunya adalah energi listrik. Hingga saat ini sumber energi di sektor kelistrikan masih didominasi oleh batubara, gas dan minyak bumi sebagai bahan bakar pembangkit listrik, baik yang dimiliki PLN maupun swasta. Dimana perhatian lebih khusus saat ini pada energi terbarukan, yaitu energi panas bumi. Energi panas bumi berasal dari sumber energi panas yang terkandung didalam air panas, uap air, dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya (Azhari. 2016).

Panas bumi merupakan salah satu energi alternatif yang dapat di perbaharui dan ramah lingkungan. Selain itu keberadaannya di Indonesia sangat melimpah mengingat Negara Indonesia mempunyai banyak gunung berapi. Menurut Ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (2017), salah satu energi panas bumi yang diperkirakan memiliki potensi cukup besar di Pulau Jawa yaitu daerah gunung Pandan tepatnya terletak di Kabupaten Bojonegoro Jawa Timur, diprediksikan memiliki manifestasi energi panas bumi sekitar 60 MW dengan suhu permukaan lebih dari 35⁰C. Hal ini dibuktikan dengan munculnya mata air panas di beberapa lokasi, antaranya wilayah gunung Nongko, Tengaring, Jari (Selo Gajah) dan gunung Puru (Utama. 2012).

Di lokasi penelitian daerah gunung Pandan terdapatnya manifestasi mataair panas, mataair panas tersebut bersifat mengumpul dan berdekatan yang merupakan indikasi awal potensi panas bumi. Penelitian panas bumi yang berkaitan dengan pendugaan sebaran air panas di daerah gunung Pandan belum diketahui secara pasti.

Pola sebaran air panas ini perlu dilakukan sebagai langkah awal perkiraan potensi panas bumi di wilayah tersebut.

Berdasarkan hasil penelitian potensi panas bumi yang pernah dilakukan oleh Thoha (2014), dengan melakukan pemetaan geologi yang didukung oleh struktur petrografi dan geologi di Desa Klino Kecamatan Ngambon disekitar lereng utara gunung Pandan, hasil yang diperoleh yaitu terdapat unit batuan vulkanik di daerah gunung Pandan.

Penelitian lain juga dilakukan oleh Elyusa (2018), di daerah gunung Pandan menggunakan metode magnetik dan geokimia. Hasil penelitian geokimia menunjukkan adanya aliran hidrotermal secara *outflow* dan *upflow*, temperatur reservoir panas bumi diklasifikasikan dalam temperatur sedang yaitu 125-225°C.

Hasil penelitian dengan metode magnetik menunjukkan persebaran nilai residual magnetik rendah yang menggambarkan adanya aktifitas panas dibawah permukaan berada pada timur laut dan barat wilayah penelitian.

Penelitian panas bumi di daerah gunung Pandan pernah dilakukan dengan beberapa metode geofisika namun belum pernah menggunakan metode resistivitas dan georadar. Metode resistivitas merupakan metode pendugaan kondisi bawah permukaan untuk mengetahui nilai resistivitas batuan dengan memanfaatkan arus

listrik yang diinjeksikan kedalam bumi melalui dua buah elektorda arus, kemudian perbedaan nilai potensial yang dihasilkan diukur dengan menggunakan dua elektroda potensial. Metode resistivitas akan jauh lebih menarik didukung oleh metode geofisika lain yang sesuai, salah satunya adalah menggunakan metode georadar. Metode GPR digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan bawah permukaan dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan melalui suatu *transmitter*, respon dari batuan bawah permukaan akan terekam oleh *receiver*.

Interpretasi hasil resistivitas didasari oleh sifat-sifat batuan terkait dengan reaksinya terhadap aliran listrik yang diinjeksikan. Semakin padat suatu batuan, maka nilai resistivitasnya akan semakin tinggi dan semakin porous suatu batuan, maka nilai resistivitasnya semakin menurun. Daerah panas bumi dapat diindikasikan dengan rendahnya nilai resistivitas batuan, karena pada lapisan batuan yang suhunya tinggi akan melarutkan mineral sehingga lapisan tersebut memiliki nilai resistivitas rendah. Sifat alami fluida yang mengandung mineral akan lebih mudah melepaskan mineral jika suhu bahan meningkat atau resistivitas bahan menurun. Fluida yang bersentuhan dengan panas akan naik ke atas karena densitas fluida panas lebih ringan dari fluida biasa. Adanya rekahan-rekahan batuan merupakan jalannya fluida panas yang terdapat di permukaan berupa manifestasi mataair panas. Penelitian pendugaan sebaran air panas menggunakan metode resistivitas dan georadar telah dilakukan oleh Suciningtyas (2013) di daerah

Blawan-Ijen sementara di wilayah gunung Pandan belum dilakukan menggunakan metode tersebut.

Berdasarkan uraian di atas maka dilakukan penelitian lanjutan dengan mengkombinasikan metode resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan untuk menentukan struktur bawah permukaan berdasarkan interpretasi 3D.

Diharapkan dari interpretasi pemodelan 3D yang diperoleh, maka sebaran akuifer sebagai lapisan yang mengandung air panas dapat diperkirakan arah sebarannya.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana struktur bawah permukaan berdasarkan interpretasi 3D data resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan?
2. Bagaimana pola sebaran air panas berdasarkan hasil pengolahan data resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan mempunyai beberapa batasan, yakni:

1. Lokasi penelitian berada di Desa Jari Kecamatan Gondang sebelah Utara daerah gunung Pandan Jawa Timur pada posisi $7^{\circ}24'17.92''$ - $7^{\circ}24'42.22''$ LS dan $111^{\circ}48'50.37''$ - $111^{\circ}49'27.96''$ BT.
2. Metode yang digunakan adalah metode geolistrik resistivitas konfigurasi Schlumberger dan metode georadar.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menentukan struktur bawah permukaan berdasarkan interpretasi 3D data resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan.
2. Menentukan pola sebaran air panas berdasarkan data resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan.

1.5 Manfaat Penelitian

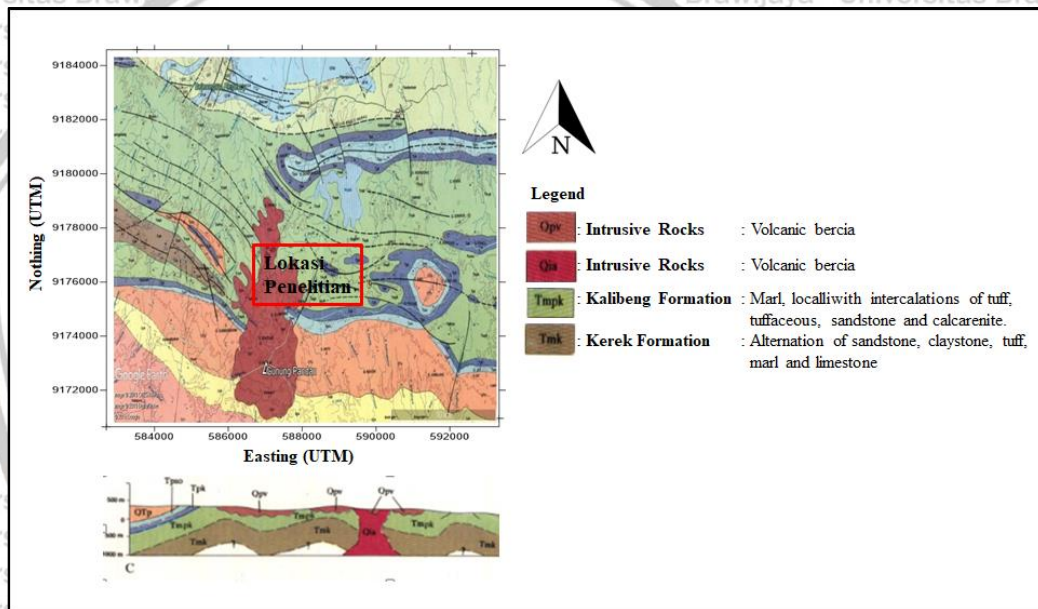
Manfaat dilaksanakannya penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai struktur bawah permukaan dan pola sebaran air panas, sehingga dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan pengembangan dan kegiatan eksplorasi selanjutnya.
2. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini, secara umum dapat dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar sebagai usaha untuk mengembangkan wisata kolam permandian air panas di daerah tersebut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kondisi Geologi Umum Daerah Gunung Pandan

Secara administratif daerah gunung Pandan termasuk dalam wilayah Kabupaten Bojonegoro Jawa Timur. Daerah ini berada di bagian Selatan peta geologi regional lembar Bojonegoro Jawa Timur, ditunjukkan pada Gambar 2.1,



Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Bojonegoro (Pringgoprawiro, 1992)

Secara fisiografinya termasuk dalam Lajur Kendeng dibagian selatan yang terdiri atas perbukitan berbentuk kasar dengan lereng agak landau sampai curam, mencapai ketinggian antara 150 hingga 897 mdpl. Batuan penyusunnya sebagian besar terdiri atas batuan sedimen seperti batuan lempung karbonat (napal), batu lempung dan batu pasir, serta satuan gunungapi yang berasosiasi dengan

manifestasi panas bumi berupa mataair hangat dan batuan ubahan. Pada Mendala Kendeng ini terdapat batuan gunungapi muda yang berumur Plistosen akhir terdiri atas endapan lahar. Kegiatan tektonik selama Neogen menjadikan daerah panas bumi gunung Pandan banyak dijumpai struktur geologi serta lipatan, sesar naik, sesar mandatar, sesar normal dan kekar (Ditjen EBTKE. 2017).

Struktur geologi di daerah gunung Pandan berupa kelurusan topografi, kelurusan sungai, pemunculan mataair panas, serta data-data primer di lapangan dalam bentuk offset litologi dan breksi sesar. Berdasarkan kondisi tersebut terdapat dua jenis struktur geologi yang berkembang, yaitu sesar normal dan sesar mendatar. Secara umum, orientasi struktur geologi di daerah gunung Pandan dominan berarah timur-laut daya dan barat laut-tenggara, meskipun terdapat beberapa sesar berarah relatif barat-timur (Ditjen EBTKE. 2017).

Sumber panas (*heat source*) dalam sistem panas bumi daerah gunung Pandan diperkirakan berhubungan dengan tubuh batuan plutonik yang berasosiasi dengan batuan plutonik muda. Reservoir pada sistem panas bumi daerah gunung Pandan diduga berada pada batuan sedimen dan ditandai oleh tahanan jenis $>10-60 \Omega m$ dengan temperatur berkisar antara $150^{\circ}C-165^{\circ}C$. Batuan penudungnya berupa lapisan lempung hasil proses alterasi batuan. Karakteristik lapisan ini berupa lapisan konduktif dengan nilai tahanan jenis $<10 \Omega m$. Daerah gunung Pandan terdapat manifestasi panas bumi berupa sumber mataair panas, mataair tersebut yaitu mataair Banyukuning dan mataair Jari (Selo Gajah) dengan pH netral, air

bertipe klorida, klorida-bikarbonat dan bikarbonat (Ditjen EBTKE, 2017).

Manifestasi permukaan daerah gunung Pandan dapat dilihat pada tabel 2.1.

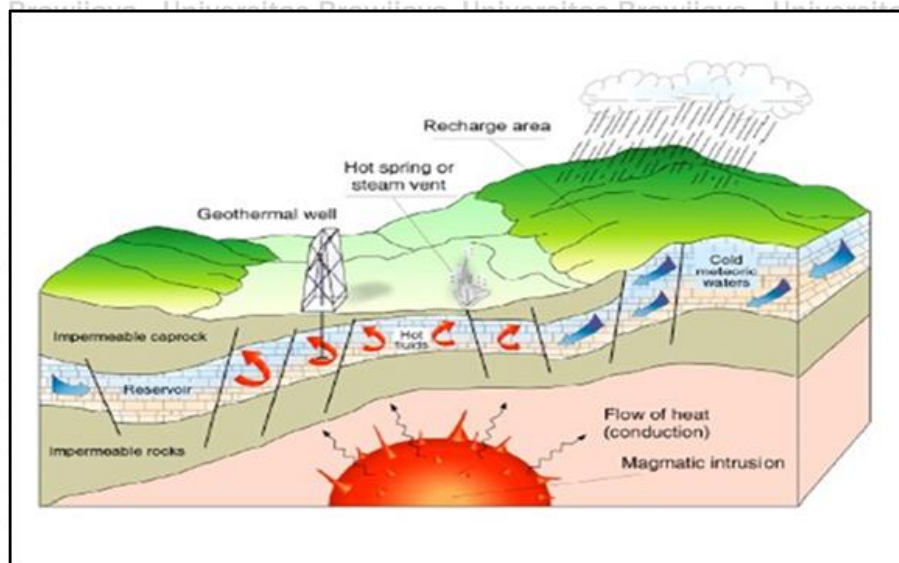
Tabel 2. 1 Manifestasi permukaan kompleks gunung Pandan

Lokasi sampel	Jenis	Bujur	Lintang	Elevasi (m)	Temp. Permukaan (T ⁰ C)	Keasaman (pH)
G. Nongko	Air hangat	111.8011	-7.4139	307	52.8	-
Tengaring	Air hangat	111.7761	-7.4239	293	43	-
G. Puru	Air hangat	111.8013	-7.4283	305	36.2	-
Jari (Selo Gajah)	Air hangat	111.8188	-7.4126	207	43.1	6.4

2.2. Panas Bumi

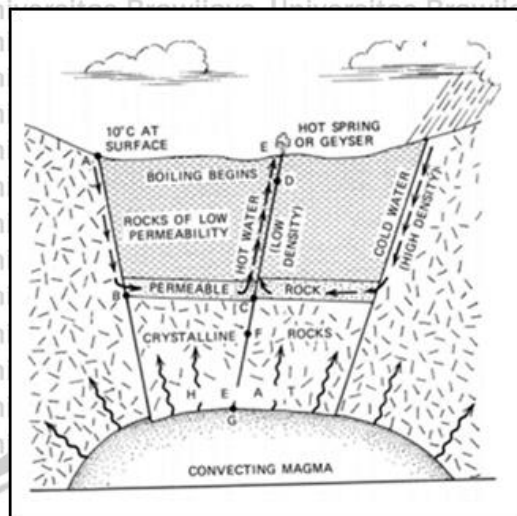
Panas bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air dan batuan bersama mineral ikutan lainnya yang secara genetik semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Pemanfaatan panas bumi diperlukan proses penambangan. Energi panas bumi bersifat diperbaharui, relatif ramah lingkungan, berpotensi besar dan dapat mengurangi ketergantungan energi nasional akan bahan bakar minyak (UU RI No. 27 tahun 2003). Panas bumi sangat berkaitan dengan aktivitas tektonik yaitu, penunjaman lempeng samudera ke bawah lempeng kontinen dan pemekaran lantai samudera oleh arus konveksi magma.

Panas bumi juga dapat dipengaruhi oleh aktivitas struktur yang besar seperti sesar atau patahan. Skema dari sistem geothermal diperlihatkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Skema sistem geothermal ideal (Dickson & Fannelli, 2004)

Sistem panas bumi dideskripsikan sebagai konveksi air di kerak bumi yang membawa energi panas dari sumber panas (*heat source*) menuju *heat sink*. Tiga elemen utama sistem panas bumi yaitu sumber panas, reservoir panas bumi, dan fluida pembawa panas. Sumber panas dapat berupa intrusi magma yang suhunya sangat tinggi ($>600^{\circ}\text{C}$) dan dapat mencapai kedalaman relatif dangkal sekitar (5-10 km). Reservoir panas bumi adalah batuan permeable tempat terjadinya sirkulasi panas yang dibawa oleh fluida pembawa panas. Reservoir panas bumi umumnya dilindungi oleh lapisan penudung (*cap rock*) yaitu batuan impermeable yang menjaga tekanan reservoir. Selain itu reservoir juga terhubung oleh zona recharge dan zona discharge melalui struktur dan rekahan yang ada (Dickson dan Fanelli, 2004). Model konveksi fluida pada sistem panas bumi dapat diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Model konveksi fluida pada sistem panas bumi (Dickson dan Mario, 2005)

Mekanisme fluida yang terdapat pada reservoir sistem panas bumi mengikuti konsep dari konveksi fluida panas seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Fluida meteorik dingin yang berasal dari zona recharge bergerak ke bawah permukaan dan menuju ke sumber panas (*heat source*) akibat adanya gravitasi bumi. Fluida yang dekat dengan sumber panas akan mengalami pemanasan secara konduksi oleh batuan disekitar sumber panas. Panas tersebut mengakibatkan terjadinya aliran konveksi fluida didalam reservoir. Fluida panas memiliki densitas yang lebih rendah daripada fluida dingin sehingga fluida tersebut cenderung bergerak keatas. Fluida panas tersebut bergerak keatas melalui rekahan-rekahan batuan yang ada dan muncul sebagai manifestasi permukaan (Dickson dan Mario: 2005).

Manifestasi panas bumi suatu wilayah memiliki potensi geothermal dapat diketahui dengan ditemukannya manifestasi permukaan. Menurut Badan Standardisasi Nasional (1998), jenis-jenis manifestasi terbagi menjadi beberapa macam diantaranya:

1. Air panas (*hot spring*), terbentuk karena adanya aliran panas di bawah permukaan melalui rekahan-rekahan.
2. Tanah beruap (*steaming ground*) merupakan jenis manifestasi dimana uap panas (*steam*) keluar dari permukaan tanah. Uap tersebut berasal dari lapisan dekat dengan permukaan yang mengandung air panas.
3. Tanah panas (*warm ground*) yaitu adanya sumberdaya geothermal di bawah permukaan yang dapat ditunjukkan dengan adanya tanah yang memiliki temperatur tinggi dari temperatur tanah disekitarnya.
4. Fumarol yaitu lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung butiran-butiran air (*wet steam*).
5. Solfatara yaitu hembusan gas gunungapi terutama mengandung gas-gas oksida seperti H₂O dan endapan belerang.

Klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan struktur geologinya dibagi menjadi tiga tipe (Saemundsson, 2009) antara lain:

1. Sistem panas bumi berasosiasi dengan vulkanik, dimana sumber panasnya berasal dari intrusi magma. Sistem tipe vulkanik ini banyak ditemui di Pulau Jawa.
2. Sistem konveksi yang bersinergi dengan daerah tektonik aktif, dimana sumber panas berasal dari kerak bumi yang cukup dalam namun aliran panasnya melebihi aliran panas rata-rata.
3. Sistem panas bumi berasosiasi dengan sedimen, dimana terjadi akibat proses pengendapan yang sangat cepat sehingga fluida hidrotermal mengalami tekanan

yang sangat tinggi. Sistem panas bumi ini juga disebut sistem panas bumi geopressure.

Pemanfaatan energi panas bumi di berbagai negara dalam berbagai bidang telah dilakukan sejak lama. Saat ini penambangan dan pemanfaatan energi panas bumi telah dilakukan di Indonesia. Indonesia salah satu negara yang kaya akan potensi panas bumi. Kekayaan panas bumi di Indonesia dikarenakan Indonesia berada pada zona subduksi tumbukan lempeng Pasifik, lempeng India-Australia, dan lempeng Eurasia.

2.3. Metode Geofisika

Metode geofisika merupakan ilmu yang mempelajari tentang struktur bumi dengan melakukan pengamatan/pengukuran sifat fisis di atas permukaan bumi menggunakan kaidah atau prinsip-prinsip fisika (Santoso, 2002). Penelitian geofisika digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan, maka dari pengukuran tersebut akan dapat diketahui sifat-sifat dan kondisi di bawah permukaan baik secara vertikal ataupun secara horizontal. Metode penelitian geofisika dibagi menjadi dua bagian, yaitu metode geofisika aktif dan metode geofisika pasif untuk mengukur respon di dalam bumi dan mengidentifikasi jenis struktur bawah permukaan. Metode geofisika aktif menggunakan sumber medan buatan seperti dinamis, pemberian arus listrik dan lain sebagainya, sedangkan metode geofisika pasif yaitu menggunakan sumber medan alami yang dipancarkan bumi seperti halnya radiasi gelombang gempa bumi, medan gravitasi

bumi, medan magnetik dan lain sebagainya. Metode geofisika dapat diterapkan di suatu lokasi penelitian dengan tujuan dan target yang ingin dicapai.

Metode geofisika yang sesuai dan seringkali digunakan untuk penelitian panas bumi yaitu metode geolistrik resistivitas. Pemanfaatan radar juga sering digunakan sebagai metode yang cepat dan akurat untuk memprediksi kondisi bawah permukaan. Metode geofisika yang memanfaatkan radar disebut georadar.

Penggunaan metode georadar diterapkan pada suatu alat yang disebut GPR (*Ground Penetrating Radar*).

2.3.1. Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik resistivitas (tahanan jenis) merupakan salah satu dari kelompok metode geolistrik yang di gunakan untuk mempelajari kondisi bawah permukaan dengan mempelajari sifat-sifat aliran listrik pada medium bawah permukaan. Metode geolistrik resistivitas memanfaatkan arus listrik yang diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua buah elektroda arus, kemudian beda potensial yang dihasilkan diukur dengan menggunakan dua elektroda potensial.

Hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda tertentu digunakan untuk menentukan variasi harga hambatan jenis masing-masing lapisan di bawah titik ukur.

Pada kenyataannya metode geolistrik resistivitas sebagian dari arus listrik yang diinjeksikan pada lapisan tanah, menjalar ke dalam pada kedalaman tertentu dan bertambah besar dengan bertambahnya jarak antar elektroda. Pada pengukuran geolistrik resistivitas jika jarak dua elektroda diperbesar, distribusi potensial pada

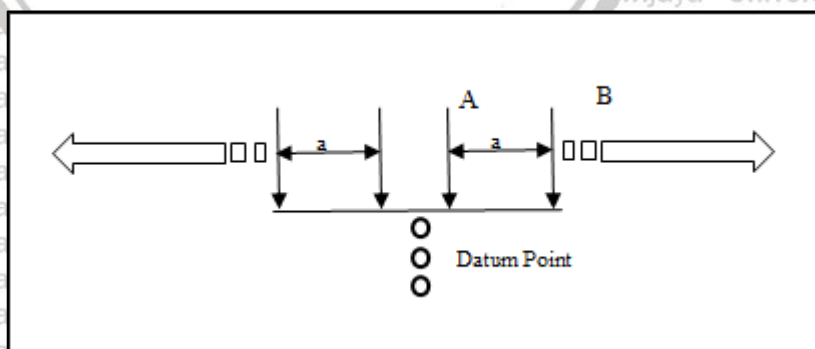
permukaan bumi semakin membesar dengan nilai resistivitas yang bervariasi (Vingoe, 1972). Adanya asumsi dasar yang digunakan dalam metode geolistrik resistivitas (Robinson, 1988), yaitu:

1. Bawah permukaan tanah terdiri dari beberapa lapisan yang dibatasi oleh bidang batas horizontal serta terdapat kontras resistivitas antara bidang batas peralihan tersebut.
2. Setiap lapisan mempunyai ketebalan tertentu, kecuali untuk lapisan terbawah yang kedalamannya tak terhingga.
3. Setiap lapisan dianggap bersifat homogen isotropik.
4. Tidak ada sumber arus selain arus yang diinjeksikan diatas permukaan bumi.
5. Arus listrik yang diinjeksikan adalah arus listrik searah.

Menurut Telford (1976), berdasarkan tujuannya, metode geolistrik resistivitas dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Metode geolistrik jenis sounding

Metode ini bertujuan untuk menyelidiki perubahan tahanan jenis bawah permukaan kearah vertikal, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.

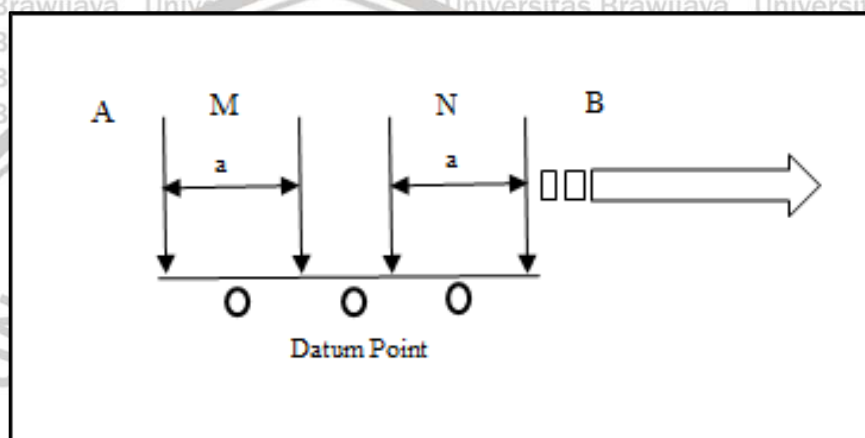


Gambar 2. 4 Perpindahan elektroda secara sounding (Hamid, 2010)

Berdasarkan gambar 2.4 dengan titik ukur tetap, jarak elektroda arus dan tegangan diubah-ubah sehingga semakin besar jarak antar elektroda maka efek dari material yang dalam akan tampak.

2. Metode geolistrik jenis mapping

Metode ini bertujuan untuk menyelidiki perubahan tahanan jenis bawah permukaan secara horizontal (lateral), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.

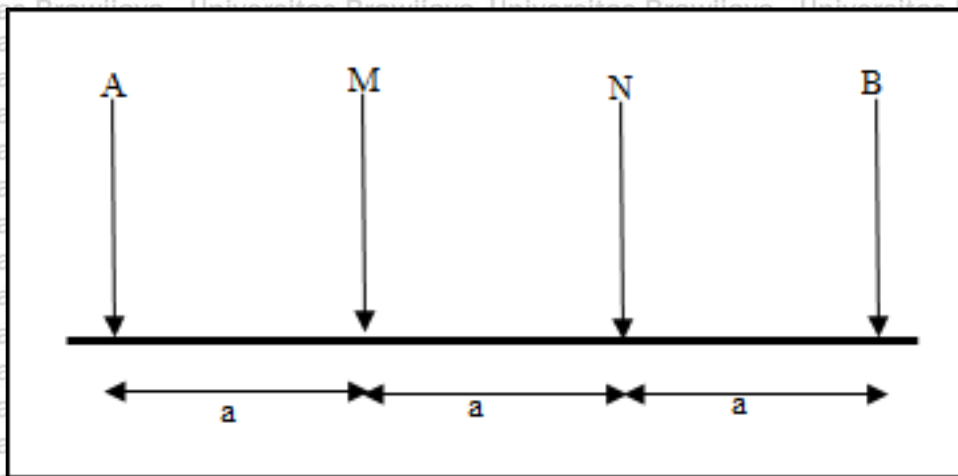


Gambar 2. 5 Perpindahan elektroda secara mapping (Hamid, 2010)

Pada metode ini, dilakukan dengan cara menggeser titik ukur secara horizontal dengan jarak elektroda dan tegangan tetap, kedalaman yang tersurvei akan sama karena pergeserannya ke arah horizontal.

2.3.1.1. Konfigurasi Elektroda

Bentuk konfigurasi geolistrik resistivitas terdiri dari empat elektroda, dapat dilihat pada gambar 2.6, dimana penyusunan elektroda arus dan potensial yang di atur sedemikian rupa sesuai dengan tujuan atau target yang hendak di capai. Pada penempatan elektroda, biasanya elektroda-elektroda terletak pada suatu lintasan berbentuk garis lurus dan simetris.



Gambar 2.6 Penempatan elektroda pada pengukuran geolistrik resistivitas

Keterangan:

A dan B = Elektroda arus (*current electrode*)

M dan N = Elektroda potensial (*potential electrode*)

a = Jarak antar elektroda

Elektroda arus biasa ditulis dengan lambing C1 dan C2 sedangkan elektroda potensial P1 dan P2. Pada saat pengambilan data dilapangan, keempat elektroda tersebut di tancapkan ke dalam tanah. Arus listrik dari power supply dialirkan ke dalam bumi melalui elektroda arus C1 dan C2, akibatnya timbul beda potensial yang di ukur melalui elektroda potensial P1 dan P2.

Adapun penempatan konfigurasi elektroda yang biasa digunakan dalam metode geolistrik resistivitas antara lain: konfigurasi Wenner, Schlumberger, Wenner-Schlumberger, Pole-pole, Pole-dipole, dan Dipole-dipole. Biasanya konfigurasi yang sering digunakan dalam eksplorasi yaitu konfigurasi Wenner, Schlumberger, Wenner-Schlumberger dan Dipole-dipole.

2.3.1.2. Resistivitas Semu

Resistivitas semu bukan merupakan resistivitas rerata spasial suatu formasi bawah permukaan yang homogen. Resistivitas semu merupakan resistivitas yang diperoleh dari pembacaan nilai potensial di bawah permukaan dengan asumsi seolah medium tersebut homogen isotropis. Pada saat arus diinjeksikan ke dalam bumi, pengaruh dalam bentuk beda potensial yang diamati secara tidak langsung adalah hambatan jenis suatu lapisan bumi tertentu. Namun nilai ini bukanlah nilai hambatan jenis yang sesungguhnya. Hambatan jenis ini merupakan besaran yang nilainya bergantung pada spasi elektroda yang dipakai. Padahal pada kenyataannya bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan nilai resistivitas yang berbeda-beda, sehingga potensial yang diukur merupakan pengaruh dari lapisan-lapisan tersebut. Hambatan jenis ini disebut resistivitas semu (Subchi, 2010).

Resistivitas semu (*apparent resistivity*) dapat dirumuskan dengan:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \tag{2.1}$$

dimana

ρ_a = Resistivitas semu (Ωm)

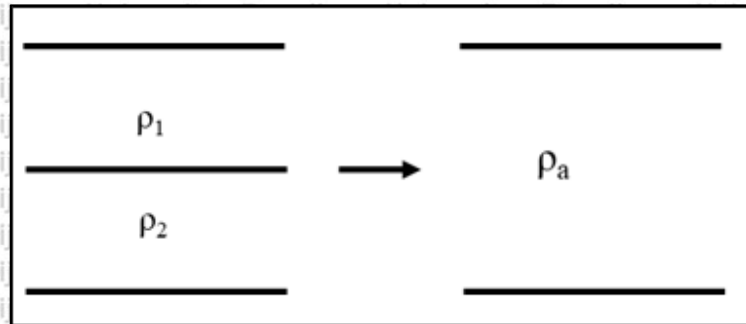
K = Faktor geometri (m)

ΔV = Beda potensial (V)

I = Kuat arus (A)

Bumi merupakan medium berlapis dengan masing-masing lapisan mempunyai nilai resistivitas yang berbeda-beda. Perhatikan gambar 2.5 dimisalkan bahwa medium yang ditinjau terdiri dari dua lapis dan mempunyai nilai resistivitas yang berbeda ρ_1 dan ρ_2 . Dalam pengukuran medium ini akan dianggap sebagai satu

lapisan yang homogen dan mempunyai satu nilai resistivitas yaitu ρ_a (*apparent resistivity*).



Gambar 2. 7 Konsep resistivitas semu (*apparent resistivity*)

Resistivitas semu (*apparent resistivity*) yang dihasilkan oleh setiap konfigurasi akan berbeda walaupun jarak antar elektrodanya sama. Untuk medium berlapis, harga resistivitas semu ini akan merupakan fungsi jarak bentangan (jarak antar elektroda arus). Untuk jarak antar elektroda arus yang kecil akan memberikan ρ_a yang harganya mendekati ρ batuan di dekat permukaan, sedangkan untuk jarak bentangan yang besar, ρ_a yang diperoleh akan mewakili harga ρ batuan yang lebih dalam (Suciningtyas. 2013).

Dalam kaitan dengan metode geolistrik, digunakan definisi-definisi sebagai berikut:

$$\text{Resistansi } R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Dimana

R = Resistansi (Ω)

V = Beda potensial antara dua buah titik (*Volt*)

I = Kuat arus yang mengalir (*A*)

$$\text{Resistivitas } \rho = \frac{E}{J} \quad (2.3)$$

Dimana

ρ = Resistivitas (Ωm)

E = Medan listrik (V/m)

J = Rapat arus listrik (A/m)

$$\text{Konduktivitas } \sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.4)$$

Dimana

σ = Konduktivitas bahan (Ω/m)

ρ = Resistivitas (Ωm)

Prinsip dasar metode geolistrik resistivitas adalah hukum Ohm, dimana beda potensial ΔV akan timbul karena adanya arus I searah yang mengalir. Berdasarkan nilai beda potensial dan arus didapatkan nilai resistansinya (Reynolds. 1997).

Hubungan antara potensial dan arus yang mengalir, dirumuskan sebagai berikut:

$$V=IR \quad (2.5)$$

dimana

R = Resistansi (Ω)

V = Beda Potensial (V)

I = Kuat arus yang melalui bahan (A)

Untuk suatu selinder konduktor dengan panjang L dan luas penampang A , medan listrik yang ditimbulkan oleh potensial V yaitu:

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.6)$$

Tahanan jenis dirumuskan sebagai

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.7)$$

Dari persamaan (2.2), diperoleh

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{VA}{IL} \quad (2.8)$$

dimana

ρ = Resistivitas (Ωm)

R = Resistansi (Ω)

L = Panjang selinder (m)

A = Luas penampang selinder (m^2)

Menurut Telford (1980), mengasumsikan bahwa bumi sebagai medium yang homogen isotropik. Jika dialirkan dengan rapat arus (\vec{J}) pada penampang (dA) maka arus yang melewati penampang tersebut adalah

$$d\vec{I} = \vec{J}dA \quad (2.9)$$

Berdasarkan hukum Ohm, hubungan antara rapat arus (\vec{J}) dan medan listrik (\vec{E}) adalah:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (2.10)$$

dimana

E = Medan listrik (V/m)

σ = Konduktivitas bahan (Ω/m)

Medan listrik merupakan gradien dari potensial skalar, yaitu

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) disubstitusikan ke persamaan (2.10), diperoleh

$$\vec{J} = -\sigma\nabla V \quad (2.12)$$

Jika di asumsikan muatannya tetap, berarti tidak ada arus yang keluar atau arus masuk dalam suatu volume tertutup, dengan arus permukaan A , maka dapat ditulis:

$$\int_A \vec{J}d\vec{A} = 0 \quad (2.13)$$

Sesuai teorema Gauss yang menyatakan bahwa integral volume dari divergensi (penyebaran) arus yang melalui suatu daerah tertutup sama dengan jumlah muatan total dalam volume tertutup, maka

$$\int_A \vec{J} d\vec{A} = \int_0^\alpha \vec{\nabla} \vec{J} dV \quad (2.14)$$

maka

$$\vec{\nabla} \vec{J} dV = 0 \quad (2.15)$$

$$\vec{\nabla} \vec{J} = 0 \quad (2.16)$$

Dari persamaan 2.16 diperoleh

$$\vec{\nabla} \vec{J} = -\vec{\nabla} \vec{\nabla} (\sigma V) = 0 \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17), jika diturunkan menjadi

$$\vec{\nabla} \sigma \vec{\nabla} V + \sigma \vec{\nabla}^2 V = 0 \quad (2.18)$$

Jika nilai konduktivitas medium (σ) bernilai konstan, maka nilai $\vec{\nabla} \sigma = 0$ sehingga dari persamaan (2.18) menjadi

$$\vec{\nabla}^2 V = 0 \quad (2.19)$$

Jadi distribusi potensial listrik untuk medium homogen isotropik memenuhi persamaan Laplace.

2.3.1.3. Potensial Pada Elektroda Arus Tunggal di Permukaan Bumi

Apabila arus I diinjeksikan ke dalam bumi yang homogen isotropis melalui sebuah elektroda di permukaan pada suatu titik P, arus itu akan tersebar ke semua arah sama besar dan besarnya potensial di titik yang berjarak r dari titik P dapat

ditentukan. Persamaan Laplace yang berhubungan dengan kondisi ini dituliskan dalam sistem koordinat bola, seperti:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (2.20)$$

Asumsi bumi homogen isotropik, maka bumi mempunyai sifat simetri bola, sehingga potensial V merupakan fungsi r saja yaitu

$$V = V(r) \quad (2.21)$$

Karena disini hanya arus tunggal, maka arus yang mengalir simetris terhadap θ dan ϕ , sehingga persamaan (2.20) menjadi

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0$$

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2dV}{rdr} = 0 \quad (2.22)$$

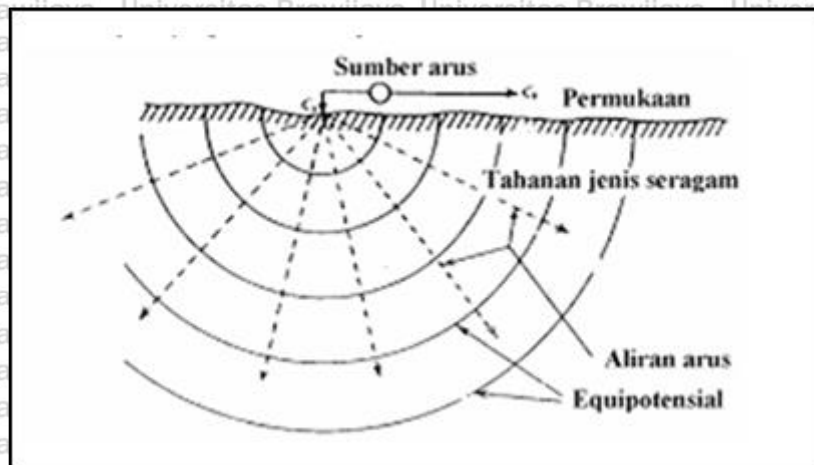
Sehingga solusi persamaan Laplace mempunyai solusi

$$V(r) = \frac{C_1}{r} + C_2 \quad (2.23)$$

Jika nilai $r = \infty$ (jarak sangat jauh dari sumber), maka nilai potensialnya sama dengan nol sehingga nilai $C_2 = 0$ dan persamaan (2.23) menjadi

$$V(r) = \frac{C_1}{r} \quad (2.24)$$

Dari persamaan (2.24), tampak bahwa ekuiopotensialnya berupa permukaan bola dengan garis aliran arus dan medan listriknya kearah radial. Oleh karena harga konduktivitas udara sama dengan nol, maka permukaan ekuiopotensial di dalam bumi berupa permukaan setengah bola, seperti terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Titik arus dalam bumi homogen isotropis (Telford. 1976)

Besarnya rapat arus (J) pada jarak dapat ditulis sebagai berikut

$$J = \frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} = \frac{1}{\rho} \frac{C_1}{r^2} \quad (2.25)$$

Besarnya arus yang menembus permukaan setengah bola yang berjarak r adalah

$$I = \int J dS = 2\pi r^2 J \quad (2.26)$$

$$I = 2\pi r^2 J = \frac{2\pi}{\rho} C_1 \quad (2.27)$$

Besarnya arus pada persamaan (2.27) akan sama dengan besarnya arus I yang di masukan melalui titik P , diperoleh

$$I = \frac{2\pi}{\rho} C_1$$

$$C_1 = \frac{\rho I}{2\pi} \quad (2.28)$$

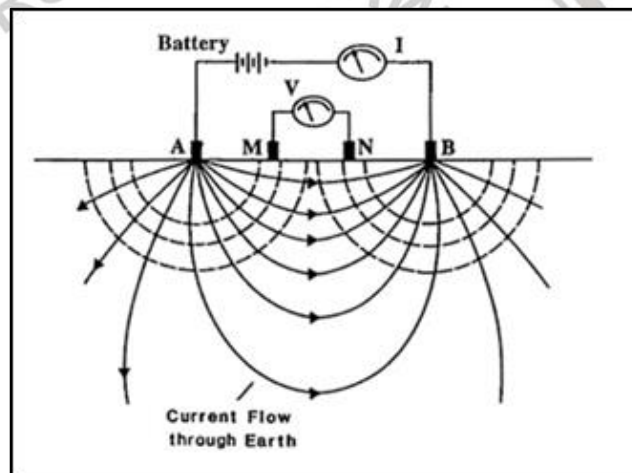
Jika persamaan (2.28) disubstitusikan kepersamaan (2.24) diperoleh

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \quad (2.29)$$

2.3.1.4. Potensial di Sekitar Dua Arus Pada Permukaan Bumi Homogen Isotropik

Penggunaan dua buah elektroda arus dan dua buah elektroda potensial yang berlawanan biasanya digunakan pada saat akuisisi data dengan metode geolistrik resistivitas. Satu elektroda digunakan untuk mengalirkan dari sumber arus ke dalam bumi serta yang lain untuk menerima arus yang keluar dari dalam bumi ke sumber (Gambar 2.9).



Gambar 2. 9 Ekuipotensial dan garis arus dari dua titik sumber arus di permukaan (Reynolds. 1997)

Berdasarkan persamaan 2.29, nilai besar potensial di titik P adalah

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.30)$$

dimana

r_1 = Jarak titik P dengan elektroda arus + (A)

r_2 = Jarak titik P dengan elektroda arus - (B)

Jika terdapat dua elektorda potensial P1 dan P2 seperti pada gambar 2.10 maka beda potensial yang terjadi pada titik P1 dan P2 akibat injeksi arus pada elektroda C1 dan C2 adalah

$$\Delta V = V(P_1) - V(P_2)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (2.31)$$

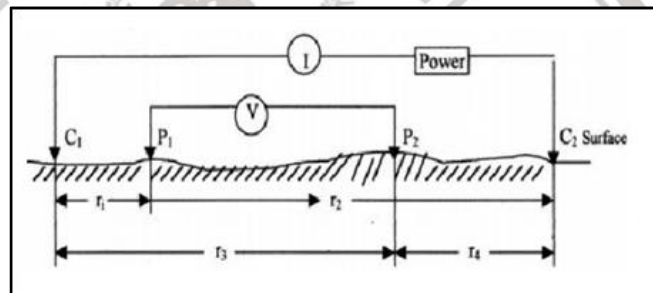
dimana

r_1 = Jarak C1 ke P1

r_2 = Jarak C2 ke P1

r_3 = Jarak C1 ke P2

r_4 = Jarak C2 ke P2

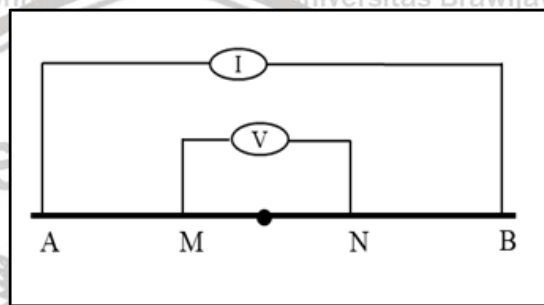


Gambar 2. 10 Dua elektroda arus dan elektroda potensial pada permukaan medium homogen isotropik (Telford. 1990)

2.3.1.5. Konfigurasi Schlumberger

Menurut Reynolds (1997), karakteristik konfigurasi elektroda Schlumberger yaitu memiliki kesesuaian yang tinggi untuk metode geolistrik resistivitas sounding dan kedalaman penetrasi sedang. Metode Schlumberger menghasilkan data resistivitas 1D. Pada penggunaan metode ini, titik tengah dari suatu pengukuran tetap pada suatu titik, tetapi spasi antar elektroda ditambah untuk mendapatkan informasi mengenai lapisan bawah permukaan yang lebih dalam (Rohma. 2018).

Dengan menggunakan gambar 2.11 maka jarak antar elektroda C1 ke titik tengah dan elektroda C2 ke titik tengah akan sama. Dimana A=C1, B=C2, M=P1, N=P2, maka akan diperoleh jarak C1 dengan C2 adalah AB dan jarak P1 dengan P2 adalah MN. Dengan demikian, jarak antara arus dengan titik tengah adalah $\frac{AB}{2}$ dan jarak antara potensial dengan titik tengah adalah $\frac{MN}{2}$.



Gambar 2. 11 Skema elektroda geolistrik konfigurasi Schlumberger

Nilai resistivitas semu dari konfigurasi Schlumberger adalah

$$\rho_s = K.R \tag{2.32}$$

Dimana K merupakan faktor geometri yang bernilai

$$K = \frac{\pi \left(\frac{AB}{2} \right)^2 - \left(\frac{MN}{2} \right)^2}{2 \left(\frac{MN}{2} \right)} \tag{2.33}$$

2.3.1.6. Resistivitas Batuan

Nilai resistivitas yang dimiliki oleh suatu batuan tergantung pada jenis materialnya, densitas, porositas, kandungan air, kualitas, suhu, ukuran dan bentuk pori-pori batuan. Survei resistivitas memberikan gambaran tentang distribusi resistivitas bawah permukaan. Untuk mengkonversi bentuk resistivitas kedalam

bentuk geologi diperlukan pengetahuan tentang tipikal dari nilai resistivitas untuk setiap tipe material dan struktur daerah survei. Adanya cairan atau air didalam sistem rekahan atau ruang antar butir dapat menurunkan nilai resistivitas batuan.

Nilai resistivitas beberapa jenis batuan dan mineral dapat di lihat dalam tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Kisaran nilai resistivitas batuan (Telford. 1976)

Material	Nilai Resistivitas (Ωm)
Air Permukaan	80-200
Air tanah	30-100
Silt-lempung	10-200
Pasir dan Kerikil	100-1000
Batu Lumpur	20-500
Batu Pasir	50-500
Konglomerat	100-500
Tuff	20-200
Kelompok Andesit	100-2000
Kelompok Granit	1000-10000
Tanah Lempung	1,5-3,0
Lempung Lanau	3,0-15
Tanah Lanau Pasiran	15-150
Batuan dasar Lembab	150-300
Pasir kerikil Kelanauan	300
Batuan dasar Tak lapuk	2400
Terdapat air tawar	20-60
Air asin	20-200
Kelompok Chert, Slate	0,18-0,24
Unconsolidate Sedimen	
Sands	1-1000
Clay	1-100
Marl	1-100
Ground Water	
Portable Well Water	0,1-1000
Breckish Water	0,3-1
Sea Water	0,05-0,2

Berdasarkan nilai resistivitas batuan dan mineral dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian (Telford. 1982):

1. Konduktor baik: $10^{-8} < \rho < 1 \Omega m$

2. Konduktor pertengahan: $1 < \rho < 10^7 \Omega\text{m}$

3. Isolator: $\rho > 10^7 \Omega\text{m}$

Nilai resistivitas batuan mencerminkan kondisi fisik batuan yang diamati. Nilai resistivitas batuan berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas batuan.

Konduktivitas dan permeabilitas pada batuan memberikan ruang untuk diisi fluida.

Fluida yang mengisi ruang pada batuan memiliki konduktivitas yang lebih tinggi

dari konduktivitas batuan disekitarnya. Oleh karena itu, keberadaan porositas dan

permeabilitas terdapatnya fluida akan memberikan nilai resistivitas yang lebih kecil

dari batuan sekitarnya. Jenis fluida juga berpengaruh harga konduktivitas. Sebagai

contoh fluida pada sistem geothermal umumnya banyak mengandung ion-ion

seperti HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- yang berkontribusi meningkatkan harga konduktivitas

batuan (Hutapea, 2010).

2.3.2 Metode GPR

Menurut Arisona (2009), metode geofisika yang menggunakan teknik

elektromagnetik yang dirancang untuk mendeteksi objek yang terkubur di dalam

tanah dan mengevaluasi keadaan objek tersebut merupakan metode GPR (*Ground*

Penetrating Radar). Alat GPR memiliki komponen penting pada proses

aplikasinya, komponen tersebut adalah antenna. Antena merupakan komponen yang

bekerja dengan cara memancarkan dan menerima sinyal gelombang

elektromagnetik. Secara praktis antena tidak mengumpulkan sinyal tunggal tetapi

banyak sinyal. Sinyal yang tampak dibentuk dari gelombang sinus dan cosinus.

Kemampuan penetrasi GPR bergantung pada frekuensi sinyal sumber, efisiensi

radiasi antena dan sifat dielektrik material. Sinyal radar dengan frekuensi yang tinggi akan menghasilkan resolusi yang tinggi, tetapi kedalaman penetrasi terbatas.

Atenuasi juga terpengaruh terhadap GPR. Material kering mempunyai atenuasi sinyal yang lebih kecil daripada material basah (Syahril. 2007).

GPR (*Ground Penetrating Radar*) menggunakan sumber gelombang elektromagnetik yang berupa radar. Pulsa yang dibangkitkan berupa pulsa bertenaga tinggi yang dipancarkan pada waktu yang sangat pendek. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ke tanah oleh transmitter melalui antenna sehingga pulsa radar mengenai dan menembus tanah lalu sinyal yang terpantul dari tanah diterima oleh receiver. Berdasarkan waktu perjalanan pulsa radar maka dapat diperhitungkan jarak objek, dan berdasarkan intensitas tenaga baliknya maka dapat ditaksirkan jenis objek yang berada di dalam tanah. Intensitas atau kekuatan pulsa radar yang diterima kembali oleh sensor dalam menentukan karakteristik spectral objek citra radar. Intensitas atau kekuatan tenaga pantulan pada citra radar dipengaruhi oleh sifat objek dan sifat sistem radarnya (Bahri. 2009).

Sistem GPR terdiri atas pengirim (*transmitter*) yaitu antena yang terhubung ke generator sinyal dengan adanya pengaturan *timing circuit* dan bagian penerima (*receiver*), yaitu antena yang terhubung ke unit pengolahan data hasil survei serta *display* sebagai tampilan *output*-nya dan *post processing* untuk alat bantu mendapatkan informasi mengenai suatu objek. GPR merupakan suatu sistem, mula-mula sinyal dihasilkan oleh generator sinyal, kemudian dipancarkan melalui antena pemancar. Sinyal mengenai objek dan *clutter* dipantulkan kembali ke antena

penerima, lalu melewati proses *sampling*, pengolahan hasil *collect data*, dan terakhir pengolahan data sehingga didapatkan informasi mengenai objek yang dideteksi (Bahri. 2009).

Dalam mengukur selang waktu antara pengirim dan penerima sinyal dapat diketahui kedalaman objek. Dalam selang waktu ini, sinyal akan bolak balik dari antenna ke objek dan kembali lagi ke antenna. Jika selang waktu dinyatakan dalam t , dan kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik dalam tanah v , maka kedalaman suatu objek dinyatakan dalam h , dapat dirumuskan sebagai

$$h = \frac{1}{2}tv \tag{2.32}$$

Untuk mengetahui keadaan objek yang dideteksi, kecepatan perambatan dari gelombang elektromagnetik haruslah diketahui

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.33}$$

Menurut Ensiklopedia (2009), kecepatan perambatan (v) tersebut bergantung pada kecepatan cahaya diudara (c) dan konstanta dielektrik relative medium perambatan (ϵ_r). Keberhasilan dari metode GPR adalah bergantung pada variasi

bawah permukaan yang dapat menyebabkan gelombang ditransmisikan. Perambatan gelombang elektromagnetik yang melewati medium ditentukan oleh tiga sifat material yaitu konstanta permitivitas (ϵ), permeabilitas (μ) dan konduktivitas (σ). Permitivitas dielektrik berkaitan dengan kemampuan medium untuk mempolarisasikan dan mengontrol kecepatan gelombang elektromagnetik yang berjalan melalui medium tersebut (Maghfiroh. 2010).

2.3 Penelitian Sebelumnya

Penelitian di daerah panas bumi pernah dilakukan oleh Suciningtyas (2013), di wilayah panas bumi Blwan-Ijen Jawa Timur, tentang pendugaan sebaran air panas dengan metode resistivitas dan georadar. Menurut penelitiannya, sebaran mata air panas Blawan-Ijen berdasarkan data geolistrik dan georadar adalah:

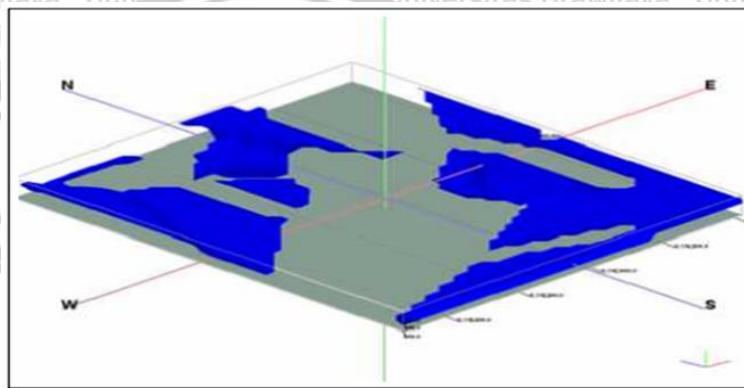
a. Adanya distribusi sebaran air panas berdasarkan data resistivitas dan georadar adalah bersifat menyebar mengikuti pola patahan yang ada. Arah sebaran mata air panas adalah menuju Timur Laut mengikuti pola aliran sungai. Beberapa mata air panas yang terdapat sepanjang jalur sungai menunjukkan bahwa lapisan pembawa panas adalah lapisan permeable dengan nilai resistivitas kurang dari 40 ohm meter.

b. Terdapatnya lapisan mengandung air panas berada dekat permukaan hingga kedalaman 15 meter dengan nilai resistivitas <40 ohm meter. Lapisan yang menunjukkan besarnya potensi air panas di Blawan-Ijen berada dekat permukaan hingga kedalaman 20 meter dengan nilai resistivitas antara 40-1280 ohm meter. Lapisan batuan diinterpretasikan sebagai batuan beku dengan nilai resistivitas >1280 ohm meter berada hingga kedalaman 30 meter. Berdasarkan kondisi

geologinya, maka jenis lapisan yang terdapat di Blawan-Ijen dibagi menjadi 2 jenis yaitu: lapisan sedimen yang merupakan endapan danau Blawan berupa lempung, tufan, endapan batu kapur, kerakal, kerikil, lempung dan pasir yang banyak mengandung air dan lapisan batuan gunungapi yang merupakan batuan

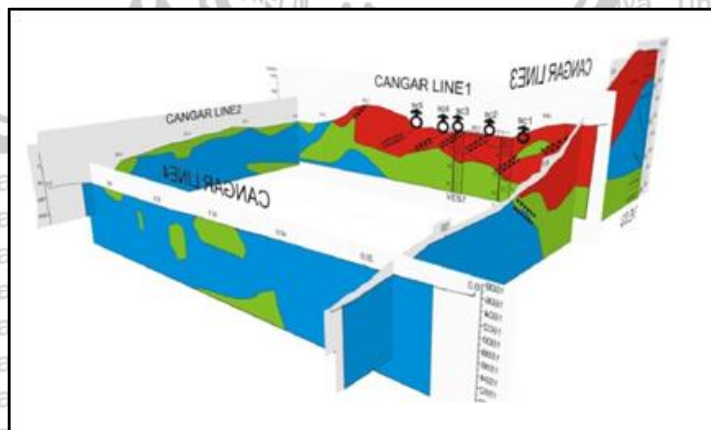
gunungapi Ijen muda dan batuan Ijen tua berupa tuf breksi gunungapi dan lava basal.

- c. Bentuk pemodelan 3D sebaran air panas disekitar mataair panas Blawan-Ijen dihasilkan dari pengolahan data geolistrik resistivitas yang digabungkan dengan hasil pengolahan 3D data GPR. Model 3D tersebut menunjukkan pola sebaran air panas adalah menuju kearah *kendeng caldera wall* bagian utara.



Gambar 2. 12 Pola sebaran air panas Blawan-Ijen (Suciningtyas, 2014)

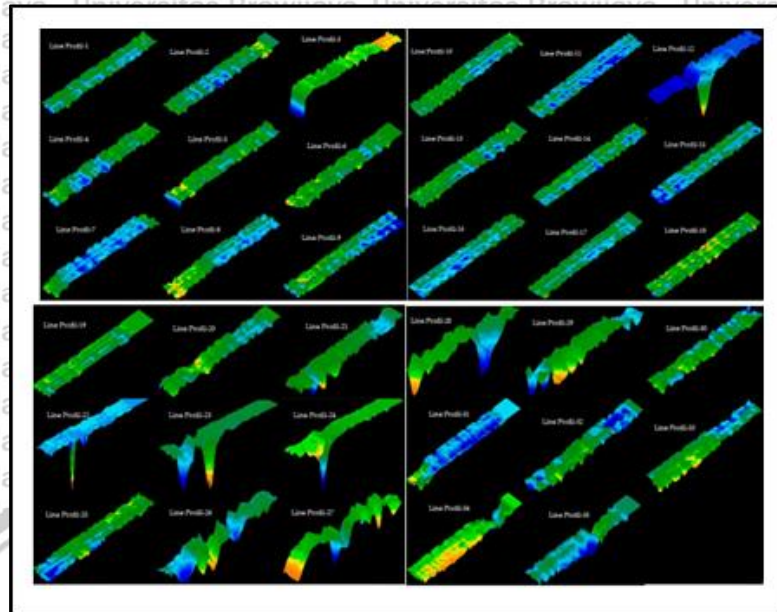
Selain penelitian disekitar sumber air panas Blawan-Ijen, terdapat penelitian serupa dengan menggunakan metode resistivitas di daerah panas bumi Cangar.



Gambar 2.13 Model geologi sumber air panas Cangar (Rakhmanto, 2011)

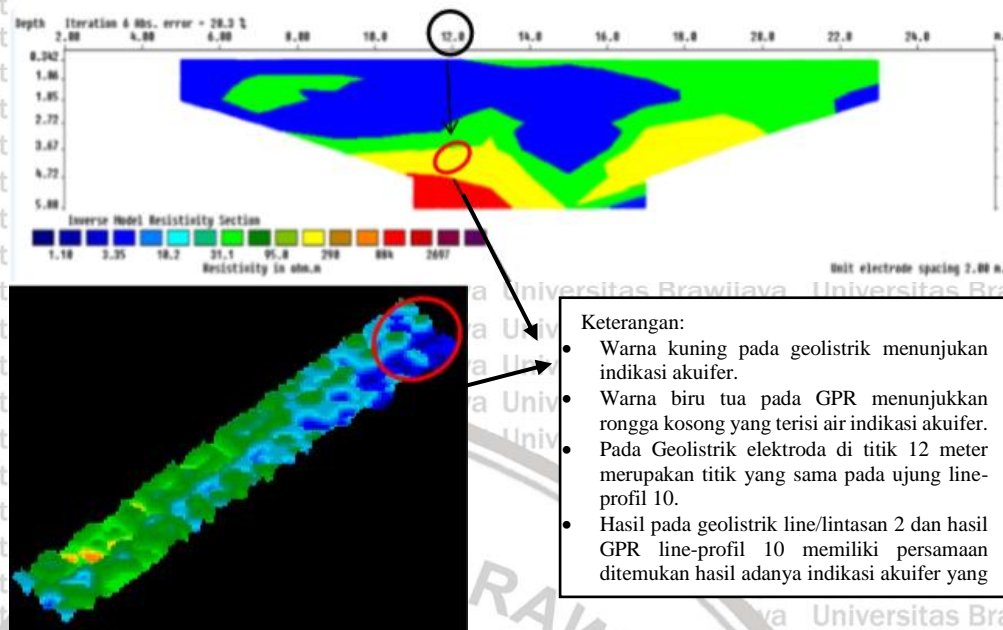
Menurut Rakhmanto (2011), sumber air panas yang terdapat pada batuan pasir/sand dengan nilai resistivitas rendah. Dimungkinkan lapisan ini merupakan lapisan campuran antara pasir dan clay dengan lapisan lava berada di bawah lapisan tersebut. Di mungkinkan panas yang mempengaruhi sumber air berasal dari lapisan lava, sehingga lapisan pasir jenuh air yang berada diatas lapisan lava tersebut menghasilkan air dengan suhu tinggi. Selanjutnya data geolistrik resistivitas tersebut diinterpretasikan sebagai berikut: warna merah pada gambar 2.13 merupakan indikasi panas bumi yang diperoleh dari hasil pengolahan resistivitas. Hasil pemodelan 3D tersebut menunjukkan bahwa lava dan tuff dengan sejumlah retakan/crack sebagai media aliran fluida air panas untuk keluar kepermukaan tanah. Sedimen pasir sebagai rombakan tanah hasil erosi dan sedimentasi sungai disekitar sumber air panas Cangar dan lapisan transisi dari lapisan batuan yang didominasi batuan lava dan tuff dengan lapisan sedimentasi. Perbedaan dominasi jenis batuan sangat mencolok, hal ini dapat dilihat kondisi di lapangan pada daerah yang didominasi oleh batuan lava dan tuff terdapat pada punggung bukit menuju gunung Welirang sedangkan kawasan yang didominasi oleh batuan pasir terdapat disekitar aliran sungai yang terdapat dibawah punggung bukit. Aliran fluida pembawa panas diperkirakan berasal dari arah pegunungan gunung Welirang yang terdapat disebelah selatan dari deretan sumber mataair panas (Rakhmanto. 2011).

Metode georadar dan geolistrik pernah diterapkan untuk mengidentifikasi aliran bawah permukaan di area Candi Songgoriti Kota Batu (Santoso. 2012).



Gambar 2. 14 Hasil Interpretasi 3D data GPR (Santoso. 2012)

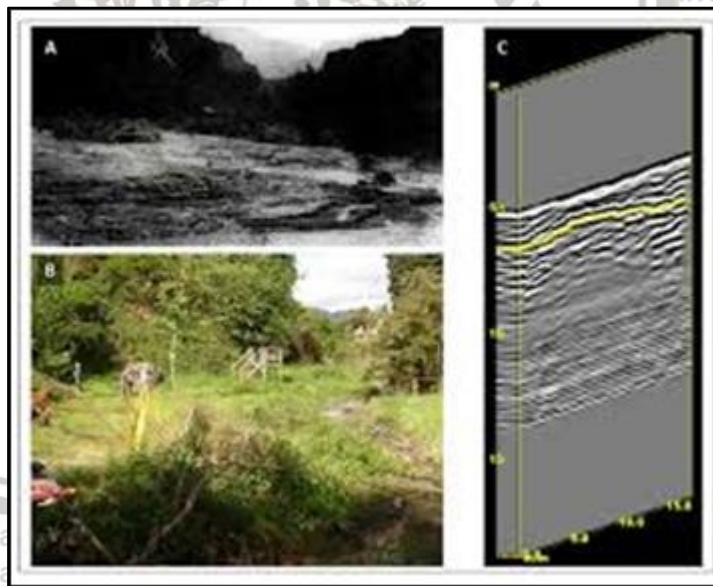
Dari hasil interpretasi data GPR diketahui sangat jelas memperlihatkan adanya beberapa indikasi arah aliran dengan sebuah dominasi warna dari arah selatan menuju ke utara atau berada didepan tubuh candi. Hal ini dapat dilihat dari dominasi cavity/rongga yang diindikasikan terisi air, terdapat di sebelah selatan atau depan tubuh candi. Dari hasil ke-7 Lintasan/line pada interpretasi geolistrik, disimpulkan bahwa lapisan batuan pembawa akuifer dominan berada pada kisaran kedalaman 4,72 m, dan untuk memperkuat hasil analisa, dapat dilihat kroscek data hasil Geolistrik pada Line 2 dan GPR pada line-profil 9 seperti pada gambar 2.14 di bawah ini. Pemilihan line untuk hasil kroscek data dipilih di satu titik yang sama atau berdekatan.



Gambar 2. 15 Analisis Data Geolistrik Resistivitas dan GPR (Santoso. 2012)

Berdasarkan hasil Geolistrik dan GPR, apabila dikorelasikan dengan data hidrogeologi, arah aliran air di perkirakan berasal dari pegunungan Kawi yang merupakan dataran tinggi yang berada di selatan Candi Songgoriti. Hal ini menyimpulkan bahwa diduga ke tiga titik mata air di candi Songgoriti berasal dari satu sumber yang sama, berasal dari arah selatan yang mengarah pada pegunungan kawi menuju ke tiga titik mata air. Aah aliran air berasal dari mata air-1 menuju mata air-2 dan menuju ke mata air-3. Hal ini diperkuat dengan adanya sifat fisik di lokasi penelitian dimana adanya sebuah semburan air yang keluar dari mata air 1 namun tidak begitu halnya dengan mata air-2 dan mata air-3. Di indikasikan bahwa mata air-2 dan mata air-3 merupakan hasil rembesan yang berasal dari mata air 1 melalui dinding-dinding sumur mata air 2 dan 3 dikarenakan lapisan semi-permeabilitas.

Daugherty (2015), melakukan uji coba metode georadar yang diterapkan di Amerika Serikat dan Selandia Baru untuk mendeteksi zona rekahan panas bumi. Penelitian tersebut merupakan penelitian pertama pemanfaatan GPR untuk zona panas bumi. Penelitian tersebut mengeksplorasi struktur aliran berkembang aktif/fosil sistem panas bumi dengan radar. Teknik ini diuji coba di beberapa panas bumi Amerika Serikat dan Selandia Baru, dimana batuan air panas sudah terkarakterisasi. Hal tersebut memungkinkan diperolehnya perbandingan langsung data GPR dengan sampel. Hasil penelitiannya yaitu menetapkan bahwa GPR dapat digunakan untuk menemukan lapisan air panas juga sebagai pendeteksi area perubahan aktif dimana tidak ada bukti panas dipermukaan.



Gambar 2.16 Air Panas Sinter tahun 1990, 2009 dan hasil GPR (Dougherty. 2015)

Pada gambar 2.16, pada gambar bagian kanan merupakan air panas Sinter tahun 1900 an, gambar di bawah merupakan kondisi wilayah mataair panas pada area yang sama diambil tahun 2009. Hasil GPR ditunjukkan oleh gambar sebelah kanan

yang mengindikasikan kondisi bawah permukaan sekitar Sinter. Garis kuning gambar hasil GPR adalah lapisan atas panas bumi yang di buktikan dengan coring.





BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

Salah satu potensi panas bumi di Indonesia terletak di Jawa Timur yaitu daerah gunung Pandan Kabupaten Bojonegoro. Potensi panas bumi nampak jelas dengan adanya manifestasi permukaan berupa mataair panas. Penyelidikan panas bumi berkaitan dengan pola sebaran air panas, memiliki hubungan dengan struktur dan manifestasi panas bumi yang dapat dilakukan dengan penyelidikan bawah permukaan menggunakan metode geofisika dan didukung dengan data geologi daerah penelitian. Metode geofisika merupakan metode pengukuran yang bertujuan untuk mengetahui kenampakan bawah permukaan secara tidak langsung.

Salah satu metode geofisika yang sesuai untuk mengetahui kondisi bawah permukaan adalah dengan menggunakan metode resistivitas. Metode tersebut bersifat aktif yaitu menginjeksikan arus melalui elektroda yang direspon oleh elektroda potensial. Perbedaan lapisan bawah permukaan akan memberikan nilai resistivitas yang bervariasi. Jarak antara elektroda akan memberikan interpretasi yang berbeda seiring dengan kedalaman titik pengukuran yang diinginkan.

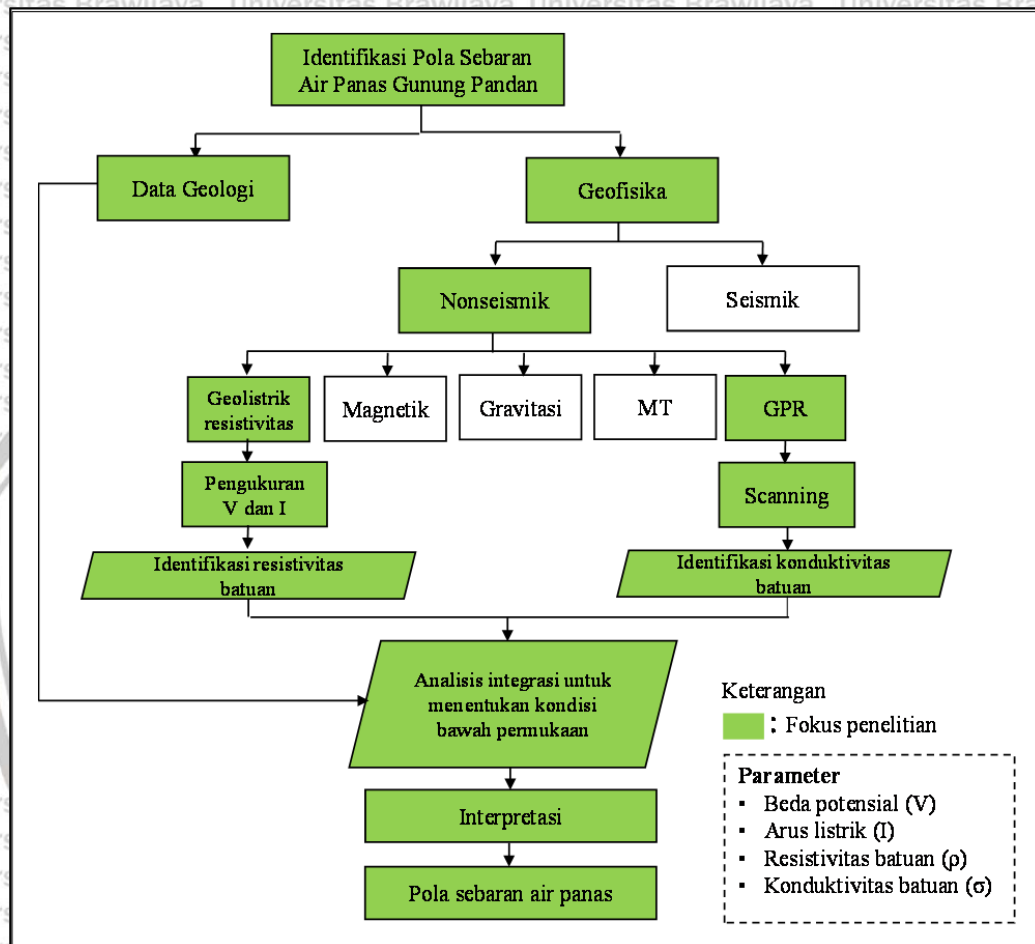
Hasil pengolahan dan interpretasi data geolistrik resistivitas tentunya akan lebih lengkap apabila dipadukan dengan metode geofisika yang lain. Metode geofisika yang dapat digunakan sebagai metode pendukung resistivitas adalah metode georadar. Metode georadar bersifat mengirimkan sinyal berupa gelombang elektromagnetik ke lapisan bawah permukaan untuk mengetahui konduktivitas

batuan bawah permukaan. Scanning dengan peralatan GPR menghasilkan gambaran visual konduktivitas batuan berdasarkan gradasi warna. Dari hasil gambar dapat diinterpretasikan secara langsung berdasarkan gradasi warna dalam hasil 3D.

Data resistivitas dan georadar digunakan sebagai langkah awal penentuan pola sebaran air panas. Interpretasi hasil resistivitas dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap 1D dan 3D. Pada tahap 1D dilakukan untuk mengindikasikan model bawah permukaan yaitu interpretasi satuan geologi, data tahanan jenis sehingga memudahkan interpretasi lapisan geologi dengan menampilkan gambar borlog persumur (VES) dari analisis tahanan jenis yang sebenarnya. Pada tahap 3D dilakukan interpolasi dengan menghubungkan titik-titik VES untuk membuat peta sebaran lapisan batuan yang menggambarkan anomali tertentu. Dari model 3D yang diperoleh, maka sebaran akuifer sebagai lapisan yang mengandung air panas dapat diperkirakan arah sebarannya.

Interpretasi data resistivitas didasari oleh sifat-sifat batuan terkait dengan reaksinya terhadap aliran listrik yang diinjeksikan. Semakin padat suatu batuan, maka nilai resistivitasnya akan semakin tinggi dan semakin porous suatu batuan, maka nilai resistivitasnya semakin menurun. Sifat resis-konduktif dari batuan dapat diamati juga menggunakan data georadar. Data georadar digunakan sebagai data pendukung lapisan bawah permukaan berdasarkan data resistivitas yang di dukung dengan data geologi daerah panas bumi gunung Pandan, dimana hasilnya akan dimodelkan dalam bentuk 3D menggunakan beberapa software pendukung. Dari

model 3D yang diperoleh, maka sebaran akuifer sebagai lapisan yang mengandung air panas di daerah gunung Pandan dapat diperkirakan arah sebarannya. Secara umum kerangka konsep penelitian dapat di lihat pada gambar 3.1.

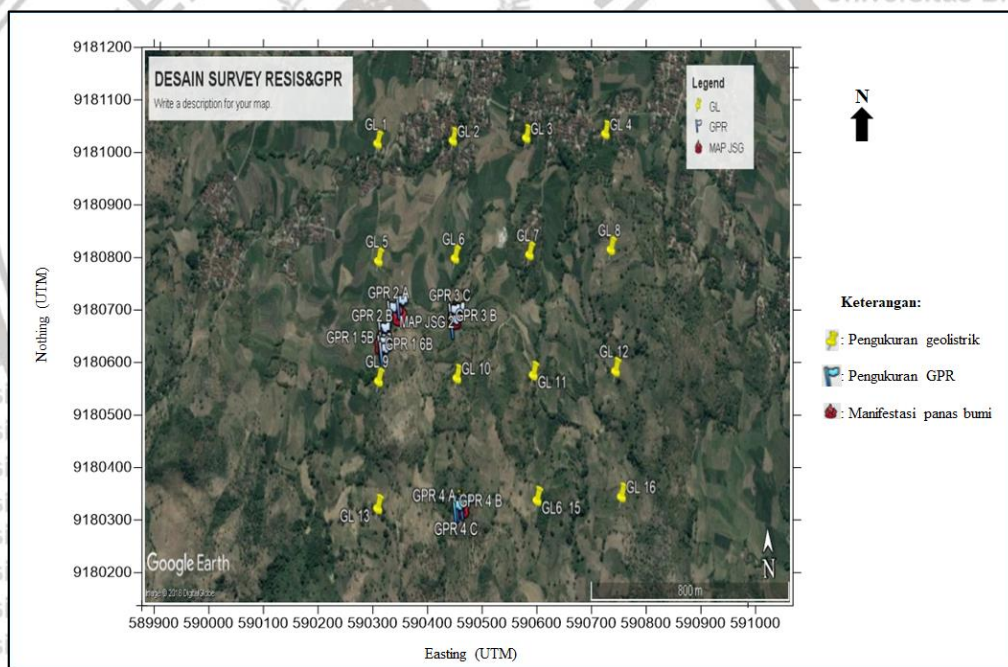


Gambar 3. 1 Kerangka Konsep Penelitian

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian dan pengambilan data dilakukan di daerah panas bumi gunung Pandan, di Desa Jari Kecamatan Gondang Kabupaten Bojonegoro Jawa Timur. Pengolahan data dilakukan di Laboratorium Geofisika Universitas Brawijaya Malang. Pengambilan data penelitian dilaksanakan pada bulan Oktober - November 2018.



Gambar 4.1 Desain survei Penelitian

4.2 Peralatan Penelitian

1. Peralatan geolistrik resistivitas:
 - a. Resistiviti merk OYYO tipe MCOHM-EL Model-2119D

- b. Dua elektroda arus dan potensial
- d. Kabel rol
- e. Palu
- f. Pasak
- g. Rolmeter
- h. Tali
- i. GPS
- j. Penjepit buaya

Untuk pengolahan data menggunakan perangkat lunak yaitu *Microsoft Excel 2010*, *Software Progress3* dan *Software Rockwork*.

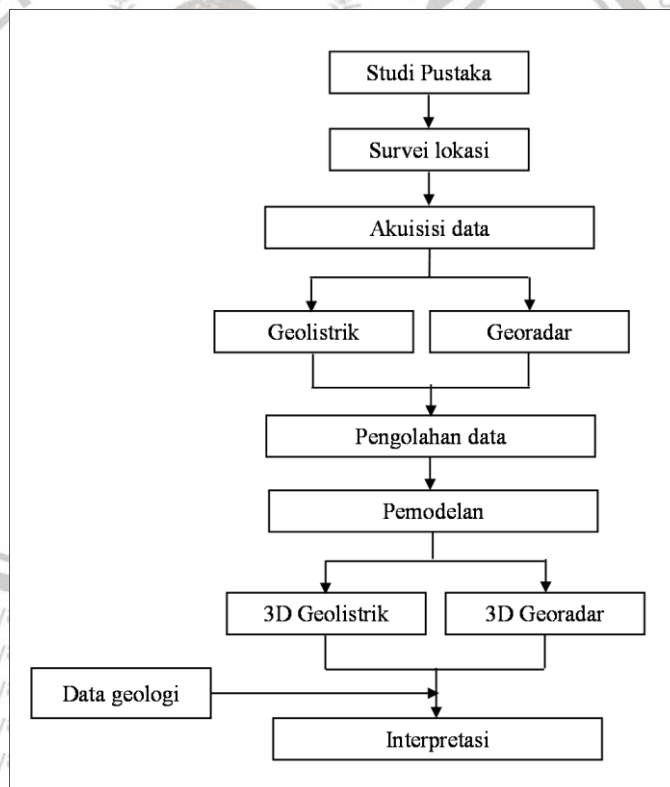
2. Peralatan georadar

- a. 1 unit control
- b. 1 buah *probe* horizontal
- c. 1 batang penghubung probe
- d. 1 USB Bluetooth Dongle
- e. 1 external power supply
- f. 1 charger untuk external power supply
- g. 1 buah kabel untuk external power supply
- h. 1 buah laptop yang sudah terinstal 3D software *Vizualizer3D Future series*.

4.3 Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan studi pustaka panas bumi Indonesia, setelah mendapatkan topik penelitian, ditentukan lokasi penelitian. Penentuan lokasi

penelitian didasari oleh hasil studi pustaka yang terkait dengan panas bumi dan penggunaan metode yang tepat dan sesuai untuk digunakan di lokasi pengambilan data. Selanjutnya, dilakukan proses akuisisi data di lokasi untuk memperoleh nilai resistivitas batuan sebagai dugaan awal sebaran panas bumi. Tahap selanjutnya adalah, processing data hasil akuisisi. Processing dilakukan hingga memperoleh kondisi bawah permukaan di lokasi penelitian. Hasil pengolahan data resistivitas dan GPR selanjutnya diinterpretasikan sesuai dengan pola sebaran aliran air panas. Sebelum interpretasi data, terlebih dahulu mengetahui kondisi geologi daerah survei. Secara umum prosedur penelitian dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 2 Prosedur penelitian

4.3.1 Akuisisi Data Penelitian

Akuisisi data dengan menggunakan metode geolistrik resistivitas, pengambilan datanya menggunakan konfigurasi Schlumberger dengan panjang setiap lintasan 210 m, terdiri dari 16 titik VES. Sedangkan akuisisi data dengan menggunakan metode GPR yaitu meng-cover area di atas permukaan sekitar mataair panas.

Terdapat 4 zona lokasi perekaman GPR terdiri dari 21 line profil, terletak di dalam area akuisisi data resistivitas.

4.3.2 Prosedur Pengukuran

1. Pengukuran resistivitas

- a. Penentuan titik ukur berdasarkan kondisi lapangan yang memungkinkan untuk dilakukan pengukuran sehingga didapatkan gambaran secara menyeluruh mengenai lokasi yang diteliti.
- b. Menggunakan konfigurasi Schlumberger.
- c. Akuisisi data didesain berbentuk grid melingkupi manifestasi mataair panas, dengan panjang setiap lintasan 210 m, terdiri dari 16 titik VES dan spasi elektroda arus AB/2.
- d. Data-data lapangan yang diperoleh berupa potensial, arus, posisi elektroda arus dan potensial serta koordinat titik penelitian.

2. Pengukuran georadar menggunakan GPR

- a. Penentuan titik ukur berdasarkan kondisi lapangan yang memungkinkan untuk dilakukan scanning sehingga didapatkan gambaran mengenai lokasi yang diteliti.

- b. Pengambilan data GPR meng-cover area di atas permukaan mataair panas, terdapat 4 zona perekaman dan terdiri dari 21 line profil.
- c. Pengambilan data menggunakan *proble* horizontal dimana lintasannya lurus dan kecepatan langkah kaki operator pembawa *proble* konstan.
- d. Data lapangan diperoleh berupa koordinat lintang dan bujur, gambar hasil scanning berupa data *imaging* dengan pola gradasi warna yang langsung disimpan di komputer dalam bentuk JPG.

4.3.3 Pengolahan data

Pengolahan data pada metode geolistrik resistivitas yaitu dengan metode VES (*Vertical Electrical Sounding*) dilakukan menggunakan software *progress3* untuk menunjukkan nilai resistivitas dari setiap lapisan yang ditampilkan dalam bentuk kurva hubungan nilai resistivitas semu (ρ_a) dengan spasi elektroda arus ($AB/2$) untuk konfigurasi Schlumberger. Selanjutnya pada pengolahan data, variabel masukkan menggunakan *forward modelling* kemudian *inverse modelling* yang dilakukan hingga diperoleh nilai kesalahan minimum berupa nilai RMS (*Root Mean Square*) minimum dengan parameter berupa lapisan (*layer*), kedalaman (*depth*) dan nilai resistivitas sebenarnya. Berdasarkan hasil tersebut dilakukan interpolasi dengan menghubungkan titik-titik VES sehingga dihasilkan pemodelan 3D dengan menggunakan software *Rockwork*.

Pengolahan data pada metode georadar dilakukan secara langsung dengan menggunakan software *Vizualizer3D*. Software ini langsung menampilkan kondisi

area yang disurvei berdasarkan pola gradasi warna yang dihasilkan dari proses pengambilan data.

4.3.4 Interpretasi Data Penelitian

1. Interpretasi data resistivitas

Interpretasi hasil resistivitas dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap 1D dan 3D.

Pada tahap 1D dilakukan untuk mengindikasikan model bawah permukaan

secara vertical (sounding) dalam melakukan interpretasi satuan geologi, data

tahanan jenis sehingga memudahkan interpretasi lapisan geologi dengan

menampilkan gambar borlog persumur (VES) dari analisis tahanan jenis yang

sebenarnya. Pada tahap 3D dilakukan interpolasi dengan menghubungkan titik-

titik VES untuk membuat peta sebaran lapisan batuan yang menggambarkan

anomali tertentu. Dari model 3D yang diperoleh, maka sebaran akuifer sebagai

lapisan yang mengandung air panas dapat diperkirakan arah sebarannya.

2. Interpretasi data georadar

Interpretasi hasil perekaman GPR dilakukan untuk mengindikasikan kondisi

bawah permukaan secara horizontal. Analisis metode GPR ini dilakukan secara

langsung dengan menggunakan software *Vizualizer 3D*. Software ini secara

langsung menampilkan kondisi area bawah permukaan yang berupa gambar

hasil scanning berupa pola gradasi warna. Hasil scanning yang telah disimpan

dalam komputer diinterpretasikan sesuai dengan kondisi daerah pengambilan

data. Karena alat GPR Future 2005 akan menampilkan kontras warna yang

dominan berupa anomali material bawah permukaan. Pola gradasi warna yang

dihasilkan akan berbeda pada lokasi yang berbeda. Kalibrasi skala warna dapat dilakukan pada awal pengolahan data, yaitu dengan memilih menu warna pada software *Vizualizer 3D*.





BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengolahan Data Penelitian

Hasil data resistivitas dan georadar menggunakan GPR yang diperoleh diolah sehingga mendapatkan hasil yang memudahkan interpretasi. Tahap pengolahan data resistivitas dibagi menjadi 2 tahap yaitu tahap 1D dan tahap 3D. Tahap 1D dilakukan untuk mengindikasikan model bawah permukaan secara vertical (sounding) dengan menggunakan software *progress3*, yaitu dilakukan inversi forward modelling kemudian inversi modelling hingga diperoleh nilai kesalahan minimum RMS (*Root Mean Square*) yang kecil, untuk memodelkan bawah permukaan setiap titik VES dari analisis tahanan jenis sebenarnya. Nilai resistivitas dari setiap lapisan ditampilkan dalam bentuk kurva hubungan nilai tahanan jenis semu (ρ_a) vs jarak setengah spasi elektroda arus ($AB/2$) pada konfigurasi Schlumberger. Tahap 3D dilakukan interpolasi menggunakan software *rockworks* untuk menghubungkan titik-titik VES sehingga diperoleh pola sebaran resistivitas batuan pada lokasi penelitian. Selanjutnya dilakukan interpretasi sebagai hasil pengolahan data berupa nilai resistivitas yang sebenarnya, ketebalan dan kedalaman lapisan di lokasi penelitian. Pada georadar hasil perekaman GPR dilakukan untuk mengindikasikan kondisi bawah permukaan secara horizontal. Pada georadar tidak dilakukan pengolahan data karena hasil yang diperoleh saat melakukan scanning dengan alat GPR Future 2005 langsung menampilkan kondisi bawah permukaan

dalam bentuk 3D menggunakan software *Vizualizer 3D*. Hasilnya ditampilkan dalam bentuk gambar berupa gradasi warna sehingga langsung diinterpretasikan sesuai keadaan geologi pada lokasi penelitian.

Salah satu langkah untuk mengkarakteristikan kondisi bawah permukaan adalah dengan mengetahui nilai resistivitas batuan yang terdapat dibawah permukaan yang diperoleh dari hasil pengolahan data resistivitas. Menurut Sutarno yang dijelaskan oleh (Hadi, 2011), parameter-parameter yang mempengaruhi naik turunnya nilai resistivitas batuan disuatu daerah, antara lain: litologi, sesar, terobosan magma, porositas, suhu, tekanan dan fluida yang mengisi batuan. Resistivitas akan berkurang dengan bertambahnya porositas dan permeabilitas Jenis lapisan batuan yang terdapat di daerah gunung Pandan berdasarkan kondisi geologinya, dibagi menjadi 4 (empat) lapisan (Pringgoprawiro, 1992), yaitu:

- a. Batuan vulkanik berupa breksi Pandan yaitu breksi gunungapi.
- b. Batuan terobosan (*intrusi rocks*) berupa andesit piroksin.
- c. Formasi kerek yaitu persilangan batu pasir, batu lempung, tuff, napal dan batu gamping.
- d. Formasi Kalibeng berupa napal, setempat sisipan tuff, batu pasir.

Berdasarkan hasil pengolahan data resistivitas pada daerah gunung Pandan menghasilkan nilai resistivitas dan kedalaman yang berbeda. Interpretasi yang digunakan adalah memisahkan antar nilai resistivitas rendah dengan nilai resistivitas tinggi. Menurut Lenat (1995), nilai resistivitas rendah diduga berkaitan dengan sumber panas bumi, dimana semakin kecil nilai resistivitas, maka

konduktivitas suatu bahan akan semakin besar. Semakin naik suhu, maka nilai resistivitas batuan semakin berkurang (Schon, 1998).

Hasil pengolahan data penelitian di daerah gunung Pandan berdasarkan acuan data resistivitas dan pola yang terbentuk, maka nilai resistivitas batuan di daerah gunung Pandan dibagi menjadi 4 (empat) lapisan dengan dasar pemilahan kondisi daerah sebagai berikut:

- a. Nilai resistivitas rendah diinterpretasikan terdapatnya banyak aliran sungai dan lapisan kandungan air panas.
- b. Nilai resistivitas lebih besar diatas nilai resistivitas lapisan kandungan air panas diinterpretasikan terdapatnya batuan yang merupakan lapisan kedap air.
- c. Nilai resistivitas lebih besar diatas nilai resistivitas lapisan kedap air diinterpretasikan terdapatnya batuan yang dapat menyimpan air (*akuifer*).
- d. Nilai resistivitas tinggi diinterpretasikan kondisi daerah merupakan daerah gunungapi (lava), merupakan lapisan sumber panas. Menurut Lenat (1995), sistem hidrotermal mempunyai jangkauan nilai resistivitas 10-200 Ωm dan lava 200-10.000 Ωm .

Untuk mencari sumber air panas, terlebih dahulu harus mengetahui pola sebaran aliran air panas (Maryanto, 2016). Pada umumnya, mataair di daerah pegunungan berasal dari rekahan/*crack* batuan yang berasal dari lava yang mengering. Untuk menentukan keberadaan lapisan batuan yang mengandung air maka dapat digunakan metode geolistrik resistivitas. Pada umumnya nilai resistivitas batuan pembawa fluida (air) biasa mempunyai nilai resistivitas 20-100 Ωm sedangkan

fluida (air) pembawa panas memiliki nilai resistivitas lebih rendah yaitu dibawah 20 Ω m, namun terdapat faktor lain yang mempengaruhi nilai resistivitas pada fluida pembawa panas antara lain jenis mineral pada wilayah tersebut (Rakhmanto. 2011).

Penelitian tentang pola sebaran air panas pernah dilakukan di beberapa daerah panas bumi dengan menggunakan metode geolistrik resistivitas. Menurut Suciningtyas (2013), nilai resistivitas batuan diduga merupakan lapisan kandungan air panas $>40 \Omega$ m. Menurut Rakhmanto (2011), nilai resistivitas batuan diduga merupakan lapisan kandungan air panas $>10 \Omega$ m. Menurut Arnata (2012), nilai resistivitas berkisar antara $\pm 2-25 \Omega$ m ditunjukkan dengan warna biru tua sampai hijau merupakan lapisan mengandung air panas diduga sebagai lapisan lempung pasir. Menurut Haerudin (2009), nilai resistivitas $\leq 35 \Omega$ m merupakan daerah reservoir (lapisan panas) diduga berupa lapisan tuff-pasiran.

Sebagai pendukung data geolistrik resistivitas, maka digunakan metode georadar dalam penelitian ini. Scanning dengan peralatan GPR menghasilkan gambaran visual konduktivitas batuan berdasarkan gradasi warna (Mujiwinarni. 2016). Hasil scanning dengan alat GPR yang diperoleh pada penelitian ini adalah berupa gradasi warna yang menunjukkan kondisi bawah permukaan daerah penelitian. Skala warna yang dihasilkan akan berbeda pada lokasi yang berbeda. Kalibrasi skala warna dapat dilakukan pada awal interpretasi data, yaitu dengan memilih menu warna pada software *Visualizer 3D*. Penelitian pada daerah gunung Pandan, hasil GPR berupa gradasi warna dapat diinterpretasikan sebagai berikut: warna biru diinterpretasikan sebagai lapisan bawah permukaan berupa zona *cavity* diduga

merupakan lapisan yang mengandung air panas. Warna hijau diinterpretasikan sebagai lapisan basah (*wet area*). Warna kuning diinterpretasikan sebagai lapisan kering atau lapisan batuan kompak. Interpretasi ini juga telah dilakukan pada beberapa penelitian diantaranya dilakukan oleh Suciningtyas (2013), untuk pendugaan sebaran air panas di daerah Blawan-Ijen. Santoso (2012), untuk mengidentifikasi aliran bawah permukaan di area Candi Songgoriti Kota Batu. Mujiwinarni (2016), untuk lokalisir *cavity* bawah permukaan dikota Malang.

Berikut adalah hasil pengolahan data geolistrik resistivitas dan georadar pada setiap titik akuisisi data di lokasi penelitian.

5.1.1 Hasil pengolahan data VES (*Vertical Electrical Sounding*)

1. Titik VES 1

Pengukuran pada titik VES 1 berada pada posisi 589987 mE hingga 9181081 mS dengan elevasi 182 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 1 ditunjukkan oleh tabel 5.1

Tabel 5. 1 Hasil Interpretasi Data VES 1

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	43,67	Lapisan penutup
5,40	585,20	Breksi
6,70	13,80	Lempung pasir
7,70	62,51	Batu Pasir
9,62	1,19	Lempung pasir
13,50	9,64	Lempung pasir
19,89	34,27	Tuff
30,19	107,93	Breksi
57,19	6,43	Lempung pasir
103,46	29,57	Tuff

Hasil pengolahan data pada titik VES 1 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,19 Ω m sampai 585,20 Ω m dengan kedalaman 103,46 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 1, diduga terdapat persilangan lempung pasir (*clay sand*), batu pasir (*sandstone*), tuff dan breksi. Lapisan yang mengandung air panas ditemukan pada kedalaman 9,62 m, 13,50 m dan 57,19 m. Hal ini dibuktikan pada kedalaman 30,19 m terdapat lapisan sumber panas yang berada di bawah lapisan air panas. Pada titik VES 1, akuisisi data tepat berada di sepanjang aliran sungai, terdapatnya singkapan batuan besar berupa batuan vulkanik yang merupakan hasil erosi maupun sedimentasi aliran sungai.

2. Titik VES 2

Pengukuran VES 2 berada pada posisi 590259 mE hingga 9181135 mS dengan elevasi 171 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 2 ditunjukkan oleh tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Hasil Interpretasi Data VES 2

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	6,18	Lapisan penutup
4,52	27,12	Tuff
6,81	8,02	Lempung pasir
7,48	3,16	Lempung pasir
16,47	3,81	Lempung pasir
19,44	5,08	Lempung pasir
22,62	4,38	Lempung pasir
33,96	7,33	Lempung pasir
50,43	25,33	Tuff
101,38	3,12	Lempung pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 2, menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 3,12 Ω m sampai 27,12 Ω m dengan kedalaman 101,38 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 2, diduga terdapat persilangan lempung pasir (*clay sand*) dan tuff. Walaupun terdapat lapisan lempung pasir (*clay sand*) tetapi kemungkinan kecil terdapat kandungan air panas karena dari susunan lapisannya tidak ditemukannya lapisan sumber panas. Akuisisi data juga berada di sepanjang aliran sungai dengan topografi yang rendah.

3. Titik VES 3

Pengukuran pada titik VES 3 berada pada posisi 590560 mE hingga 9181128 mS dengan elevasi 177 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 3, ditunjukkan oleh table 5.3.

Tabel 5. 3 Hasil Interpretasi Data VES 3

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	5,94	Lapisan penutup
3,68	96,22	Batu pasir
4,68	10,20	Lempung pasir
7,94	4,53	Lempung pasir
12,41	2,48	Lempung pasir
25,34	54,50	Batu pasir
39,80	3,50	Lempung pasir
54,68	29,64	Tuff
95,89	75,62	Batu pasir
113,34	5,52	Lempung pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 3 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 2,48 Ω m sampai 96,22 Ω m dengan kedalaman 113,34 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 3, diduga terdapat lempung pasir (*clay sand*),

batu pasir (*sandstone*) dan tuff. Dilihat dari susunan lapisan batuan tidak terdapat lapisan sumber panas pada titik VES 3 sehingga kemungkinan kecil terdapat lapisan batuan yang mengandung air panas. Akuisisi data pada titik VES berada tepat di tepi aliran sungai dengan topografi yang curam, oleh sebab itu diduga erosi aliran sungai juga mempengaruhi perlapisan batuan bawah permukaan.

4. Titik VES 4

Pengukuran pada titik VES 4 berada pada posisi 590891 mE hingga 9181119 mS dengan elevasi 175 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 4, ditunjukkan oleh table 5.4.

Tabel 5. 4 Hasil Interpretasi Data VES 4

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	5,81	Lapisan penutup
7,58	10,86	Tuff
8,21	23,40	Tuff
13,85	6,52	Lempung pasiran
19,68	1,06	Lempung pasiran
38,98	2,40	Lempung pasiran
45,33	3,22	Lempung pasiran
52,83	5,55	Lempung pasiran
60,62	1,12	Lempung pasiran
105,68	1,59	Lempung pasiran

Hasil pengolahan data titik VES 4 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,06 Ω m sampai 23,40 Ω m dengan kedalaman 105,68 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 4, diduga terdapat batuan tuff dan lempung pasiran (*clay sand*). Walaupun terdapat lapisan lempung pasiran (*clay sand*)

tetapi kemungkinan kecil terdapat kandungan air panas karena dari susunan lapisannya tidak ditemukannya lapisan sumber panas. Akuisisi data pada titik VES 4 tepat berada di tepi aliran sungai dengan topografi yang curam, oleh sebab itu diduga erosi aliran sungai juga mempengaruhi perlapisan batuan bawah permukaan.

5. Titik VES 5

Pengukuran pada titik VES 5 berada pada posisi 589963 mE hingga 9180806 mS dengan elevasi 195 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 5, ditunjukkan oleh table 5.5.

Tabel 5. 5 Hasil Interpretasi Data VES 5

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	90,37	Lapisan penutup
0,58	11,52	Lempung pasiran
2,04	57,40	Batu pasir
2,71	1,48	Lempung pasiran
5,36	8,59	Lempung pasiran
9,97	3,49	Lempung pasiran
19,84	9,38	Lempung pasiran
31,00	1,14	Lempung pasiran
97,14	1,17	Lempung pasiran
147,06	87,13	Batu pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 5, menunjukkan hasil resistivitas dengan rentang dari 1,48 Ω m sampai 90,37 Ω m dengan kedalaman 147,06 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 5, diduga terdapat lapisan batu pasir (*sandstone*) dan lempung pasiran (*clay sand*). Walaupun terdapat lapisan yang mengandung air panas, namun kecil kemungkinan terdapat kandungan air panas karena dilihat

dari susunan batuan tidak terdapatnya lapisan sumber panas. Akuisisi data berada di sepanjang aliran sungai.

6. Titik VES 6

Pengukuran pada titik VES 6 berada pada posisi 590269 mE hingga 9180809 mS dengan elevasi 177 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 6, ditunjukkan oleh tabel 5.6.

Tabel 5. 6 Hasil Interpretasi Data VES 6

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	101,63	Lapisan penutup
1,05	1,11	Lempung pasir
1,53	3,06	Lempung pasir
3,37	7,47	Lempung pasir
4,73	47,89	Tuff
6,34	2,51	Lempung pasir
27,55	3556,87	Breksi
63,16	68,29	Batu pasir
94,05	33,20	Tuff
123,86	92,74	Batu pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 6 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,11 Ω m sampai 3556,87 Ω m dengan kedalaman 123,86 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 6, diduga terdapat lempung pasir (*clay sand*), tuff, batu pasir (*sandstone*) dan breksi. Lapisan yang mengandung air panas ditemukan pada kedalaman 6,34 m. Hal ini di buktikan dengan adanya lapisan sumber panas di bawah lapisan air panas, lapisan sumber panas berfungsi memanaskan air, sehingga air tersebut masuk atau keluar melalui rekahan-rekahan batuan sebagai jalur munculnya manifestasi berupa mataair panas.

7. Titik VES 7

Pengukuran pada titik VES 7 berada pada posisi 590565 mE 9180807 mS dengan elevasi 186 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 7, ditunjukkan oleh table 5.7.

Tabel 5. 7 Hasil Interpretasi Data VES 7

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	22,38	Lapisan penutup
9,06	5,36	Lempung pasiran
14,29	108,45	Breksi
18,52	8,65	Lempung pasiran
22,41	46,77	Batu pasir
25,98	9,09	Lempung pasiran
44,92	80,78	Batu pasir
57,06	106,63	Breksi
86,44	57,03	Batu pasir
111,26	99,78	Batu pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 7 menunjukkan nilai resistivitas rendah dengan rentang dari 5,36 Ω m sampai 108,45 Ω m dengan kedalaman 111,26 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 7, diduga terdapat persilangan lapisan lempung pasiran (*clay sand*), batu pasir (*sandstone*) dan breksi. Lapisan yang mengandung air panas ditemukan pada kedalaman 9,06 m, 18,52 m dan 25,98 m. Pada kedalaman 14,29 m dan 57,06 m terdapat lapisan sumber panas berada di bawah lapisan air panas dan lapisan akuifer. Hal ini dibuktikan dengan terdapatnya mata air panas yang keluar melalui rekahan-rekahan batuan disekitar titik akuisisi data berjarak ± 100 m.

8. Titik VES 8

Pengukuran pada titik VES 8 berada pada posisi 590901 mE hingga 9180812 mS dengan elevasi 204 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 8, ditunjukkan oleh table 5.8.

Tabel 5. 8 Hasil Interpretasi Data VES 8

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	2,41	Lapisan penutup
0,81	99,45	Batu pasir
1,98	2,94	Lempung pasir
3,80	2,87	Lempung pasir
4,96	3,14	Lempung pasir
6,65	1,21	Lempung pasir
9,29	78,37	Batu pasir
28,09	20,41	Tuff
68,92	4,25	Lempung pasir
103,91	111,98	Breksi

Hasil pengolahan data pada titik VES 8 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,21 Ω m sampai 111,98 Ω m dengan kedalaman 103,91 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 8, diduga terdapat lapisan batu pasir (*sandstone*), lempung pasir (*clay sand*), tuff dan breksi. Lapisan air panas ditemukan pada kedalaman 10,98-16,65 m dan 68,92 m. Hal ini juga terbukti bahwa dibawah lapisan air panas terdapat lapisan sumber panas pada kedalaman 103,91 m.

9. Titik VES 9

Pengukuran pada titik VES 9 berada pada posisi 589952 mE hingga 9180518 mS dengan elevasi 210 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 9, ditunjukkan oleh table 5.9.

Tabel 5. 9 Hasil Interpretasi Data VES 9

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	1,17	Lapisan penutup
1,94	54,42	Batu pasir
3,36	10,35	Lempung pasiran
3,87	20,19	Tuff
9,35	13,07	Lempung pasiran
18,62	3,56	Lempung pasiran
36,60	1,14	Lempung pasiran
61,03	2,40	Lempung pasiran
74,03	1,20	Lempung pasiran
126,71	2,68	Lempung pasiran

Hasil pengolahan data pada titik VES 9, menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,14 Ω m sampai 54,42 Ω m dengan kedalaman 126,71 m.

Interpretasi hasil titik VES 8, diduga terdapat lapisan batuan batu pasir (*sandstone*), tuff dan lempung pasiran (*clay sand*). Pada kedalaman 18,62-126,71 m terdapat lapisan yang mengandung air panas, hal ini dibuktikan dengan munculnya air panas di atas permukaan dengan suhu 50^oC tepat pada titik akuisisi data resistivitas. Air panas tersebut muncul melalui rekahan-rekahan batuan dan bersifat menyebar dan berdekatan. Walaupun pada titik VES 9 tidak terdapat lapisan sumber panas, namun kemungkinan besar lapisan sumber panas berada di bawah kedalaman 126 m. Titik VES 9 berada di bagian barat \pm 100 m

dari titik VES 10, yang mana pada titik VES 10 terdapat lapisan sumber panas, sehingga aliran air panas tersebut diduga berasal dari titik VES 10 menuju ketitik VES 9 yang memiliki topografi lebih rendah.

10. Titik VES 10

Pengukuran pada titik VES 10 berada pada posisi 590258 mE hingga 9180525 mS dengan elevasi 226 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 10, ditunjukkan oleh tabel 5.10.

Tabel 5. 10 Hasil Interpretasi Data VES 10

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	71,74	Lapisan penutup
1,75	45,29	Tuff
5,63	106,84	Breksi
10,36	42,63	Tuff
13,15	86,63	Batu pasir
16,89	8,16	Lempung pasiran
32,73	41,30	Tuff
35,56	116,58	Breksi
48,46	12,53	Lempung pasiran
102,55	3,39	Lempung pasiran

Hasil pengolahan data pada titik VES 10 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang nilai dari 3,39 Ω m sampai 106,84 Ω m dengan kedalaman 102,55 m.

Interpretasi hasil pada titik VES 10, diduga terdapat lapisan tuff, breksi, batu pasir (*sandstone*) dan lempung pasiran (*clay sand*). Pada kedalaman 16,89 m, terdapat lapisan yang mengandung air panas. Di bawah lapisan air panas terdapat lapisan sumber panas berada pada kedalaman 35,56 m. Hal ini juga dibuktikan

dengan terdapatnya mataair-mataair panas yang keluar melalui rekahan-rekahan batuan berjarak ± 50 m dari titik akuisisi data.

11. Titik VES 11

Pengukuran pada titik VES 11 berada pada posisi 590594 mE hingga 9180487 mS dengan elevasi 195 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 11, ditunjukkan oleh tabel 5. 11.

Tabel 5. 11 Hasil Interpretasi Data VES 11

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	2,45	Lapisan penutup
3,53	30,72	Tuff
7,44	1,67	Lempung pasir
8,51	37,35	Tuff
13,66	3,89	Lempung pasir
25,39	1,43	Lempung pasir
40,46	1,33	Lempung pasir
98,49	1,58	Lempung pasir
116,55	10,15	Lempung pasir
122,40	4,61	Lempung pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 11, menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,33 Ω m sampai 37,35 Ω m dengan kedalaman 122,40 m.

Hasil interpretasi data pada titik VES 11, diduga terdapat lapisan tuff dan lempung pasir (*clay sand*). Walaupun terdapat lapisan air panas, namun dilihat dari susunan lapisan batuan pada titik VES 11 sangat kecil kemungkinan terdapat air panas, hal ini di karenakan tidak terdapat batuan sumber panas. Akuisisi data juga berada disepanjang aliran sungai.

12. Titik VES 12

Pengukuran pada titik VES 12 berada pada posisi 590907 mE hingga 9180488 mS dengan elevasi 217 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 12, ditunjukkan oleh tabel 5. 12.

Tabel 5. 12 Hasil Interpretasi Data VES 12

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	24,85	Lapisan penutup
1,41	58,95	Batu pasir
2,13	63,89	Batu pasir
2,54	41,89	Tuff
2,98	6,73	Lempung pasir
8,66	8,71	Lempung pasir
12,02	16,14	Lempung pasir
23,10	2,90	Lempung pasir
85,90	128,18	Breksi
132,60	470,27	Breksi

Hasil pengolahan data pada titik VES 12, menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 2,90 Ω m sampai 470 Ω m dengan kedalaman 132,60 m.

Hasil interpretasi data pada titik VES 12, diduga terdapat lapisan batu pasir (*sandstone*), tuff, lempung pasir (*clay sand*) dan breksi. Pada kedalaman 2,98 sampai 23,10 m terdapat lapisan air panas. Hal ini dibuktikan dengan pada kedalaman 85,90 m sampai 132,60 m terdapat lapisan sumber panas.

13. Titik VES 13

Pengukuran pada titik VES 13 berada pada posisi 589982 mE hingga 9180215 mS dengan elevasi 254 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 13, ditunjukkan oleh tabel 5.13.

Tabel 5. 13 Hasil Interpretasi Data VES 13

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	5,79	Lapisan penutup
0,92	18,72	Lempung pasir
6,62	5,91	Lempung pasir
8,49	9,20	Lempung pasir
12,17	6,49	Lempung pasir
14,49	49,71	Tuff
30,64	21,84	Tuff
46,41	3,94	Lempung pasir
114,61	11,85	Lempung pasir
128,78	116,63	Breksi

Hasil pengolahan data pada titik VES 13 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 3,94 Ω m sampai 116,63 Ω m dengan kedalaman 128,78 m. Hasil interpretasi pada titik VES 13, diduga terdapat lapisan batuan tuff, lempung pasir (*clay sand*) dan breksi. Pada kedalaman 0,92-12,17 m, dan 46,41-114,61 m terdapat lapisan air air panas. Hal ini dibuktikan pada kedalaman 128,78 m terdapat lapisan sumber panas.

14. Titik VES 14

Pengukuran pada titik VES 14 berada pada posisi 590287 mE hingga 9180188 mS dengan elevasi 264 mdpl. Hasil pengolahan data pada titik VES 14, menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,38 Ω m sampai 450,98 Ω m dengan kedalaman 142,79 m. Hasil interpretasi pada titik VES 14, diduga terdapat batuan tuff, lempung pasir (*clay sand*), batu pasir (*sandstone*) dan breksi. Pada kedalaman 1,47-29,71 m terdapat lapisan yang mengandung air panas. Hal ini dibuktikan dengan munculnya air panas dipermukaan melalui

rekahan-rekahan batuan dengan suhu 58°C, air panas tersebut bersifat menyebar dan berdekatan. Hal ini dibuktikan pada kedalaman 63,64 m terdapat batuan lapisan sumber panas dibawah lapisan air panas. Hasil interpretasi data pada titik VES 14, ditunjukkan oleh tabel 5.14.

Tabel 5. 14 Hasil Interpretasi Data VES 14.

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	10,78	Lapisan penutup
0,90	12,85	Lempung pasir
1,47	1,46	Lempung pasir
4,12	7,18	Lempung pasir
29,71	1,38	Lempung pasir
45,27	11,90	Lempung pasir
51,13	32,41	Tuff
63,64	450,98	Breksi
82,70	98,85	Batu pasir
142,79	56,40	Batu pasir

15. Titik VES 15

Pengukuran pada titik VES 15 berada pada posisi 590571 mE hingga 9180170 mS dengan elevasi 246 mdpl. Hasil pengolahan data pada titik VES 15 menunjukkan nilai resistivitas dengan rentang dari 1,93 Ωm sampai 200064,09 Ωm dengan kedalaman 120,37 m. Hasil interpretasi pada titik VES 15, diduga terdapat lapisan batuan tuff, batu pasir (*sandstone*), lempung pasir (*clay sand*) dan breksi. Pada kedalaman 4,92-21,76 m dan 51,08 m terdapat lapisan air panas.

Pada kedalaman 34,01 m terdapat lapisan lapisan sumber panas yang berada di bawah lapisan air panas. Hasil interpretasi data pada titik VES 15, ditunjukkan oleh tabel 5.15.

Tabel 5. 15 Hasil Interpretasi Data VES 15

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	37,94	Lapisan penutup
2,54	15,95	Lempung pasir
3,95	55,39	Batu pasir
4,92	5,96	Lempung pasir
7,05	9,87	Lempung pasir
21,76	1,93	Lempung pasir
34,01	20064,09	Breksi
51,08	4,67	Lempung pasir
82,98	43,10	Tuff
120,37	94,51	Batu pasir

16. Titik VES 16

Pengukuran pada titik VES 16 berada pada posisi 590902 mE hingga 9180184 mS dengan elevasi 251 mdpl. Hasil interpretasi data pada titik VES 16, ditunjukkan oleh tabel 5.16.

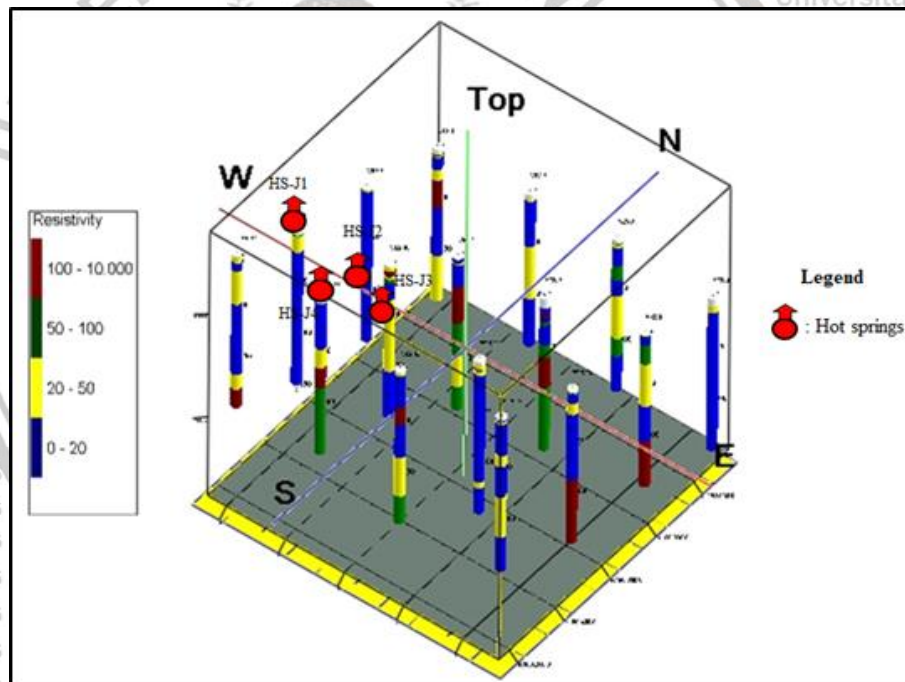
Tabel 5. 16 Hasil Interpretasi Data VES 16

<i>Depth</i>	<i>Resistivity</i>	<i>Litologi</i>
0,00	262,56	Lapisan penutup
1,90	8,26	Lempung pasir
3,15	12,72	Lempung pasir
5,48	4,20	Lempung pasir
7,53	6,28	Lempung pasir
31,30	1,71	Lempung pasir
35,64	22,39	Tuff
46,19	7,39	Lempung pasir
75,70	24,89	Tuff
114,93	1,49	Lempung pasir

Hasil pengolahan data pada titik VES 16, menunjukkan nilai resistivitas rendah antara 1,49 Ω m sampai 14,89 Ω m dengan kedalaman 114,93 m. Hasil

interpretasi data pada titik VES 16, diduga terdapat lapisan batuan lempung pasir (clay sand) dan tuff. Pada kedalaman 2,90 m, 5,48-31,30 m, 46,19 m dan 114,93 m terdapat lapisan air panas. Namun dilihat dari susunan batuan pada titik VES 16 sangat kecil kemungkinan terdapatnya air panas dikarenakan tidak terdapat lapisan batuan sumber panas. Akuisisi data pada titik VES 16 juga berada di sepanjang aliran sungai.

Untuk menghubungkan titik VES 1 sampai VES 16, maka dilakukan interpolasi yang hasilnya akan di modelkan dalam bentuk 3D, seperti yang terlihat pada gambar 5.1.



Gambar 5. 1 Interpolasi pemodelan 3D data resistivitas pada titik-titik VES

Berdasarkan hasil interpolasi pemodelan 3D data resistivitas pada titik-titik VES seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.1 diketahui nilai resistivitas rendah hingga nilai resistivitas tinggi berkisar dengan rentang dari 1,06 Ω m sampai 20064,09 Ω m,

berada pada kedalaman 0,58 m sampai 147 m. Nilai resistivitas $<20,00 \Omega\text{m}$ ditunjukkan oleh warna biru diduga sebagai jenis lapisan yang memiliki kandungan air panas, nilai resistivitas dengan rentang dari 20,01-50,00 Ωm dengan warna kuning diduga sebagai jenis lapisan kedap air, nilai resistivitas dengan rentang dari 50,01-100,00 Ωm dengan warna hijau diduga sebagai lapisan penyimpan air (*akuifer*) dan nilai resistivitas $>100,01 \Omega\text{m}$ dengan warna merah diduga sebagai lapisan sumber panas (*lava gunungapi*). Lapisan-lapisan tersebut diduga sebagai batuan lempung pasiran (*clay sand*), batu pasir (*sandstone*), tuff dan breksi. Mengingat geologi daerah gunung Pandan terdapat batuan vulkanik berupa breksi gunungapi, formasi kerek yaitu persilangan batu pasir, batu lempung, tuff, napal dan batu gamping, formasi Kalibeng berupa napal, setempat sisipan tuff, batu pasir (Pringgoprawiro. 1992).

Lapisan yang mengandung air panas tersebar merata hampir di semua titik VES.

Pemodelan 3D terlihat bahwa nilai resistivitas $<20,00 \Omega\text{m}$ sebagai lapisan yang mengandung air panas dominan terdapat pada titik VES 1, titik VES 6, titik VES 7, titik VES 8, titik VES 9, titik VES 10, titik VES 12, titik VES 13, titik VES 14 dan titik VES 15. Lapisan yang mengandung air panas ini terdapat pada kedalaman 0,58-114, 61 m.

Pada titik VES 2, titik VES 3, titik VES 4, titik VES 5, titik VES 11 dan titik VES 16 kemungkinan kecil terdapat lapisan yang mengandung air panas karena dilihat dari susunan lapisan batuan, tidak ditemukannya lapisan sumber panas.

Pada titik-titik VES tersebut akuisisi data berada di sepanjang aliran sungai,

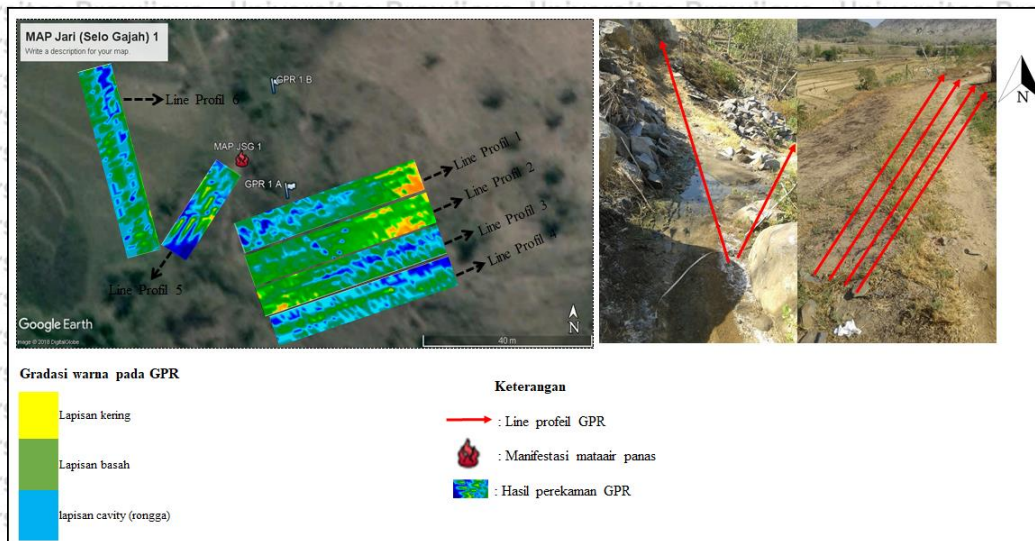
sehingga diduga erosi aliran sungai juga mempengaruhi perlapisan batuan bawah permukaan.

5.1.2 Hasil Pengolahan data Georadar

Terdapat 4 zona perekaman (*scanning*) GPR pada lokasi penelitian dilakukan dekat area terdapatnya manifestasi mataair panas. Terdapat 2 (dua) zona perekaman berada tepat pada titik akuisisi data resistivitas yaitu titik VES 9 dan titik VES 14 sedangkan dua zona perekaman lainnya berada pada jarak ± 100 m dari titik VES 9 dan titik VES 10. Hasil perekaman (*scanning*) GPR pada setiap zona ditampilkan sebagai berikut:

1. Hasil perekaman pada zona 1

Zona pertama terletak pada posisi 589988 mE hingga 9180578 mS dengan elevasi 214 mdpl dan suhu mataair panas 50°C . Pada zona ini terdapat 6 line pengukuran dengan 4 line berorientasi timur laut, 1 line berorientasi utara timur laut dan 1 line berorientasi utara barat laut. Pulse yang digunakan dalam pengambilan data adalah 30-60 dengan panjang line 11-25 m. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan pada semua line profil memiliki kedalaman 0.07-16.88 m. Manifestasinya berupa mataair panas bersifat mengumpul dan berdekatan, mataair-mataair panas tersebut keluar melalui rekahan-rekahan/*crack* batuan dengan topografi curam dan berada di tepi aliran sungai. Hasil rekaman pada zona 1 ditunjukkan pada gambar 5.2.



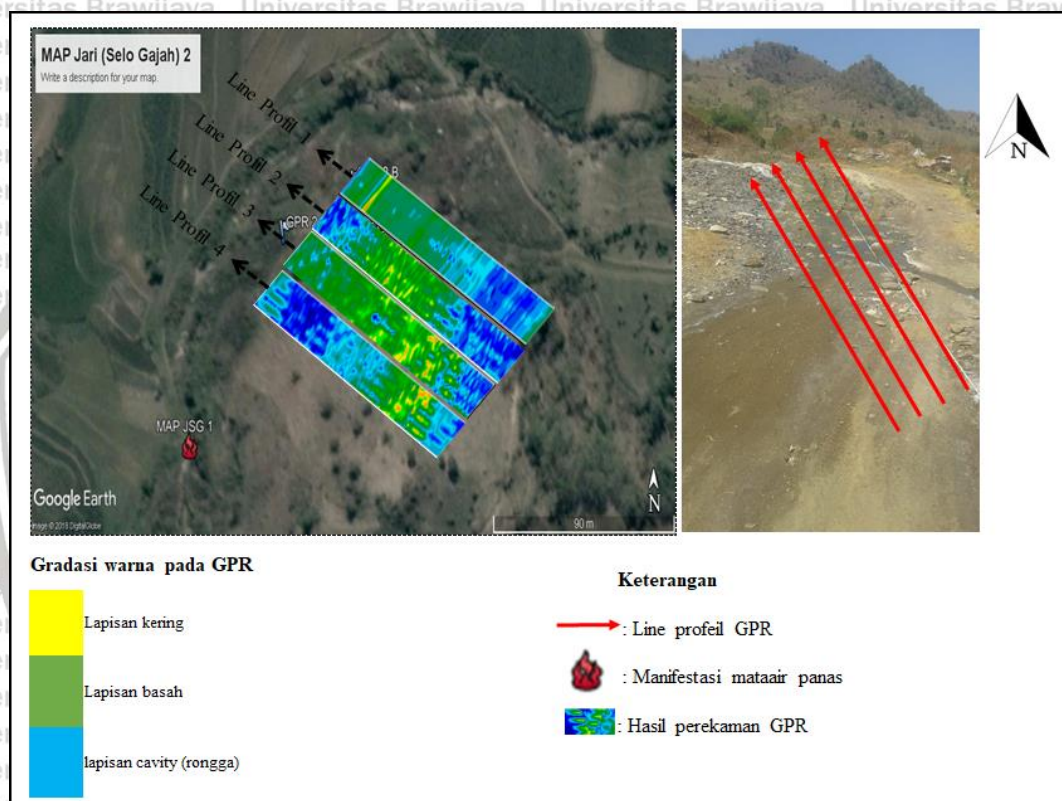
Gambar 5. 2 Hasil peta perekaman GPR pada zona 1

Berdasarkan hasil peta perekaman data GPR dapat dilihat pada zona 1 memiliki hasil perekaman data GPR yang dominan biru, hijau dan kuning. Warna biru menunjukkan zona cavity yang diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas. Hal ini terbukti pada line profil 1 dan line profil 5 scanning di lakukan tepat diatas manifestasi mataair panas, warna hijau menunjukkan lapisan basah yang mana penyusun utamanya adalah tanah dan warna kuning pada hasil perekaman diduga sebagai batuan kompak, hal ini terlihat jelas bahwa pada zona ini adanya batuan gunungapi yang tersebar di atas permukaan. Pada zona ini keberadaan rongga (cavity) yang diduga sebagai lapisan air panas berada pada kedalaman 0,15-16,88 m yang mengalami kemenerusan (Lampiran 2).

2. Hasil perekaman pada zona 2

Zona kedua terletak pada posisi 590055 mE hingga 9180661 mS dengan elevasi 209 mdpl dan suhu mataair panasnya 40°C. Pada zona ini terdapat 4 line pengukuran berorientasi barat laut. Pulse yang digunakan dalam pengambilan data

adalah 100 dengan panjang line profil 40 m. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan pada semua line profil memiliki kedalaman 0,11-14,98 m. Manifestasinya berupa mataair panas besifat mengumpul dan berdekatan, mataair-mataair panas tersebut keluar melalui rekahan-rekahan batuan dengan topografi curam dan landau. Hasil rekaman pada zona 2 ditunjukkan pada gambar 5.3.



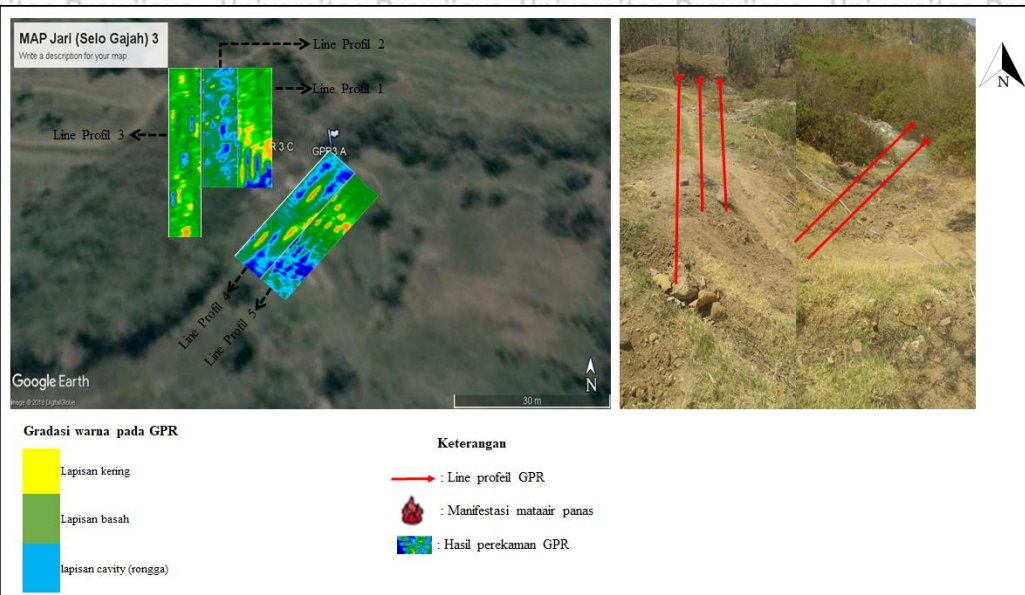
Gambar 5. 3 Hasil perekaman GPR pada zona 2

Berdasarkan hasil peta perekaman data GPR dapat dilihat pada zona 2 memiliki hasil perekaman data GPR yang dominan biru, hijau dan biru. Warna biru menunjukkan zona cavity yang diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas. Hal ini terbukti pada line profil 1 sampai line profil 4, scanning di lakukan tepat diatas manifestasi mataair panas, warna hijau menunjukkan lapisan basah yang

mana penyusun utamanya adalah tanah dan warna kuning pada hasil perekaman diduga sebagai batuan kompak, hal ini terlihat jelas bahwa pada zona ini adanya batuan gunungapi yang tersebar di atas permukaan. Pada zona ini keberadaan rongga (*cavity*) yang diduga sebagai lapisan yang mengandung air panas berada pada kedalaman 0,11-14,50 m yang mengalami kemenerusan (Lampiran 2).

3. Hasil perekaman pada zona 3

Zona ketiga terletak pada posisi 0590276 mE hingga 9180647 mS dengan elevasi 204 mdpl dan suhu matair panas 48^oC. Pada zona ini terdapat 5 line pengukuran dengan 3 line berorientasi utara dan 2 line berorientasi timur laut. Pulse yang digunakan dalam pengambilan data adalah 40-100 dengan panjang line profil 15–30 m. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan pada semua line profil memiliki kedalaman 0,21-16,56 m. Manifestasinya berupa mataair panas bersifat mengumpul dan berdekatan, mataair-mataair panas tersebut keluar melalui rekahan-rekahan/*crack* batuan dengan topografi curam dan landai, berada ±10 m dari sungai. Hasil rekaman pada zona 3 ditunjukkan pada gambar 5.4.



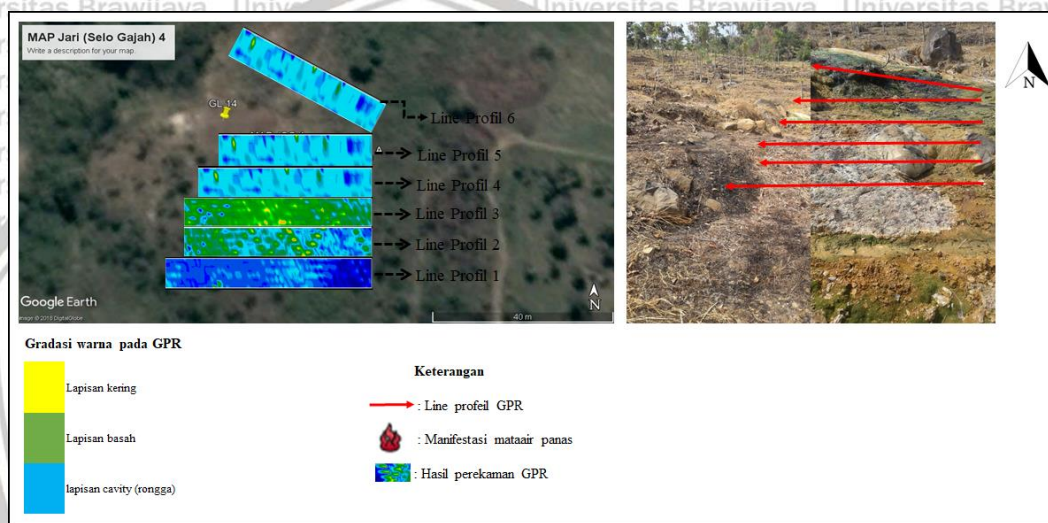
Gambar 5. 4 Hasil perekaman GPR pada zona 3

Berdasarkan hasil peta perekaman data GPR dapat dilihat pada zona 3 memiliki hasil perekaman data GPR yang dominan biru, hijau dan kuning. Warna biru menunjukkan zona cavity yang diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas, hal ini terbukti pada line profil 1, line profil 4 dan line profil 5, scanning dilakukan tepat diatas manifestasi mataair panas. Warna hijau menunjukkan lapisan basah yang mana penyusun utamanya adalah tanah dan warna kuning pada hasil perekaman diduga sebagai batuan kompak. Pada zona ini keberadaan rongga (*cavity*) yang diduga sebagai lapisan yang mengandung air panas berada pada kedalaman 0,21-11,50 m yang mengalami kemenerusan (Lampiran 2).

4. Hasil perekaman GPR pada zona 4

Zona keempat terletak pada posisi 0590284 mE hingga 9180174 mS dengan elevasi 270 mdpl dan suhu mataair panas 58°C. Pada area ini terdapat 6 line pengukuran dengan 5 line berorientasi barat dan 1 line berorientasi barat laut. Pulse

yang digunakan dalam pengambilan data adalah 60-90 dengan panjang line profil 15-27 m. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan pada semua line profil memiliki kedalaman 0,07-19,05 m. Manifestasinya berupa mataair panas besifat mengumpul dan berdekatan, mataair-mataair panas tersebut keluar melalui rekahan-rekahan/*crack* batuan dengan topografi landau dan terdapatnya singkapan batuan gunungapi. Hasil rekaman pada zona 4 ditunjukkan pada gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Hasil perekaman GPR pada zona 4

Berdasarkan hasil peta perekaman data GPR dapat dilihat pada zona 4 memiliki hasil perekaman data GPR yang dominan biru, hijau dan kuning. Warna biru menunjukkan zona cavity yang diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas, hal ini terbukti pada line profil 1 sampai line profil 6, scanning dilakukan tepat diatas manifestasi mataair panas. Warna hijau menunjukkan lapisan basah yang mana penyusun utamanya adalah tanah dan warna kuning pada hasil perekaman diduga sebagai batuan kompak. Pada zona ini keberadaan rongga (*cavity*) yang

diduga mengandung air panas berada pada kedalaman 0,07-15,43 m yang mengalami kemenerusan (Lampiran 2).

Penerapan metode GPR ditujukan untuk mengetahui keberadaan rongga (*cavity*) berdasarkan pola konduktivitas batuan bawah permukaan. Dalam penelitian ini, diperoleh pola warna yang berbeda untuk zona akuisisi yang berbeda. Dari pola warna yang ada, terlihat kondisi bawah permukaan pada keempat zona penelitian banyak kandungan fluida panas yang ditunjukkan oleh gradasi warna biru. Lapisan dengan pola warna biru membentuk hampir pada semua line profil yang diduga sebagai lapisan yang mengandung air panas. Lapisan berwarna biru sebagai rongga *cavity*, diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas berada pada kedalaman 0,07-16,88 m. Lapisan yang mengandung air panas tersebar dari bagian barat daya ke timur laut, dengan topografi yang rendah. Pola tersebut dimungkinkan adalah aliran bawah tanah yang mengalir ke arah sungai dan juga air panas yang mengalir melalui rekahan-rekahan batuan.

5.2 Pembahasan

Adanya potensi panas bumi disuatu daerah ditandai dengan terdapatnya manifestasi panas bumi. Daerah gunung Pandan merupakan salah satu daerah yang mempunyai potensi panas bumi yang ditunjukkan dengan terdapatnya manifestasi mataair panas. Penelitian di daerah gunung Pandan telah dilakukan. Berdasarkan hasil penelitian, terdapat 4 (empat) zona manifestasi panas bumi berupa mataair panas yang terdapat pada daerah penelitian yaitu mataair panas Jari 1 (HS-J1) dengan elevasi 214 mdpl dan suhu 50°C, mataair panas Jari 2 (HS-J2) dengan

elevasi 209 mdpl dan suhu 40°C, mataair panas Jari 3 (HS-J3) dengan elevasi 204 mdpl dan suhu 48°C dan mataair panas Jari 4 (HS-J4) dengan elevasi 270 mdpl dan suhu 58°C. Mataair-mataair panas tersebut keluar melalui rekahan-rekahan/*crack* batuan yang bersifat mengumpul dan berdekatan. Metode geofisika yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode geolistrik resistivitas dan salah satu metode pendukung yaitu metode georadar.

Hasil interpretasi data geolistrik resistivitas dan georadar digunakan sebagai langkah awal dalam penentuan pola sebaran air panas. Metode geolistrik digunakan untuk menginterpretasikan kondisi bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas batuan. Interpretasi tersebut berdasarkan sifat-sifat batuan berkaitan dengan reaksinya terhadap aliran listrik yang diinjeksikan. Semakin kompak suatu batuan maka nilai resistivitasnya semakin tinggi dan semakin porous suatu batuan maka nilai resistivitasnya semakin menurun. Sifat batuan inilah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dimana terdapatnya air panas pada lokasi penelitian sehingga nilai resistivitas yang digunakan adalah nilai resistivitas rendah. Terdapatnya air tanah dipengaruhi oleh sifat batuan yang porous sehingga dapat menyimpan dan mengalirkan fluida (Rohma. 2018). Penentuan lapisan air tanah, selanjutnya dipilah menurut tipe air yang dapat melewati batuan, dalam hal ini tujuan utama adalah menentukan sebaran air panas. Manifestasi mataair panas yang terdapat pada daerah gunung Pandan bagian timur laut merupakan aliran secara langsung (*upflow*) karena senyawa kimia yang dominan pada airnya adalah klorid, sedangkan manifestasi mataair panas di bagian barat daya merupakan pemunculan air panas secara lateral

(*outflow*) yang dibuktikan dengan air yang mengandung bikarbonat lebih tinggi dibandingkan kandungan klorida dan sulfat. Dengan menggunakan acuan bahwa air panas tersebut lebih konduktif di bandingkan dengan air biasa maka sebaran air panas dapat ditentukan berdasarkan nilai resistivitas rendah.

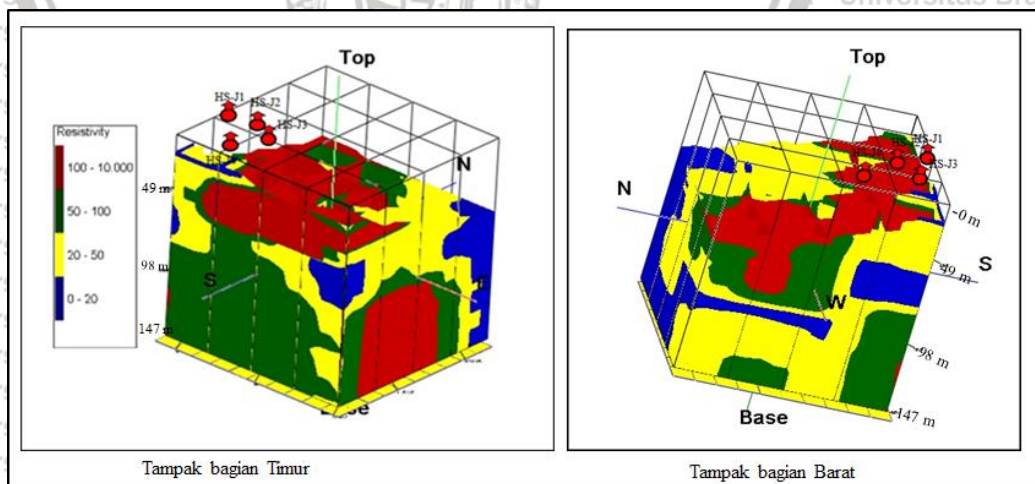
Adanya sifat resistive-konduktif dari suatu batuan dapat diamati juga dengan menggunakan data georadar. Metode georadar bersifat mengirimkan sinyal berupa gelombang elektromagnetik dibawah permukaan sehingga diperoleh data berupa gambar yang menunjukkan karakteristik bawah permukaan secara kasar yaitu hanya sebatas membedakan antara lapisan tanah kompak dan rongga (*fluida*). Data georadar dalam penelitian ini sebagai data pendukung lapisan bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas.

Faktor-faktor yang menyebabkan data georadar tidak digunakan sebagai data utama adalah: data georadar yang diperoleh berupa gradasi warna dalam bentuk gambar yang tidak memiliki digitasi nilai sehingga keakuratannya tidak diketahui secara pasti. Penggunaan software *Visualizer 3D* hanya menampilkan gradasi warna saja dan tidak disertakan legenda yang menunjukkan definisi warna. Penetrasi kedalaman pada data georadar hanya mencapai <20 m sehingga tidak bisa dibandingkan dengan data geolistrik resistivitas konfigurasi Schlumberger yang dapat mencapai kedalaman >20 m.

Mengacu dari faktor-faktor tersebut diatas, maka dalam penelitian ini data georadar sebagai data pendukung data resistivitas dalam penentuan pola sebaran air panas di daerah gunung Pandan. Namun adapun keunggulan dari metode georadar

dengan alat GPR Future 2005 yaitu kemampuan alat dalam merekam dan menginterpretasikan kondisi bawah permukaan secara praktis dan cepat tanpa melakukan pengolahan data.

Setelah mendapatkan karakteristik dan sifat metode geofisika yang digunakan, selanjutnya digunakan data pada tabel nilai resistivitas batuan dan data geologi daerah penelitian untuk menentukan jenis batuan bawah permukaan. Keadaan geologi daerah gunung Pandan terdapat batuan vulkanik berupa breksi gunungapi, formasi kerek yaitu persilangan batu pasir, batu lempung, tuff, napal dan batu gamping, formasi Kalibeng berupa napal, sisipan tuff dan batu pasir (Pringgoprawiro. 1992). Kondisi daerah gunung Pandan terdapat singkapan batuan vulkanik yang menyebar di permukaan. Ada juga batuan vulkanik yang diduga merupakan batuan vulkanik hasil erosi maupun sedimentasi aliran sungai (Thoha. 2014). Model 3D kondisi bawah permukaan berdasarkan gabungan resistivitas pada daerah gunung Pandan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.6.



Gambar 5. 6 Model 3D kondisi bawah permukaan berdasarkan gabungan hasil resistivitas pada daerah gunung Pandan

Dari gambar model 3D kondisi bawah permukaan berdasarkan gabungan resistivitas, adanya anomaly pada bagian atas dan bawah daerah penelitian dengan nilai resistivitas yang tinggi $>100 \Omega m$ dan nilai resistivitas rendah $< 20 \Omega m$ berada di antara lapisan batuan dengan nilai resistivitas tinggi. Tampak dari bagian timur terlihat adanya nilai resistivitas tinggi yang diduga merupakan jenis batuan breksi gunungapi berada pada paling bawah dan atas daerah gunung Pandan. Lapisan breksi yang berada di bawah berfungsi sebagai sumber panas (*source*) yang dapat memanaskan fluida, sedangkan lapisan breksi gunungapi yang terdapat di atas berfungsi sebagai lapisan penudung (*cap rock*). Tampak bagian barat, terlihat lapisan breksi gunungapi (*source*) sangat kecil berada di bawah, diduga lapisan ini kemungkinan berada di bawah kedalaman 147 m dan berada juga di bagian barat dan selatan daerah gunung Pandan. Pada sistem gunungapi, konduktivitas akan bertambah apabila dekat daerah magma.

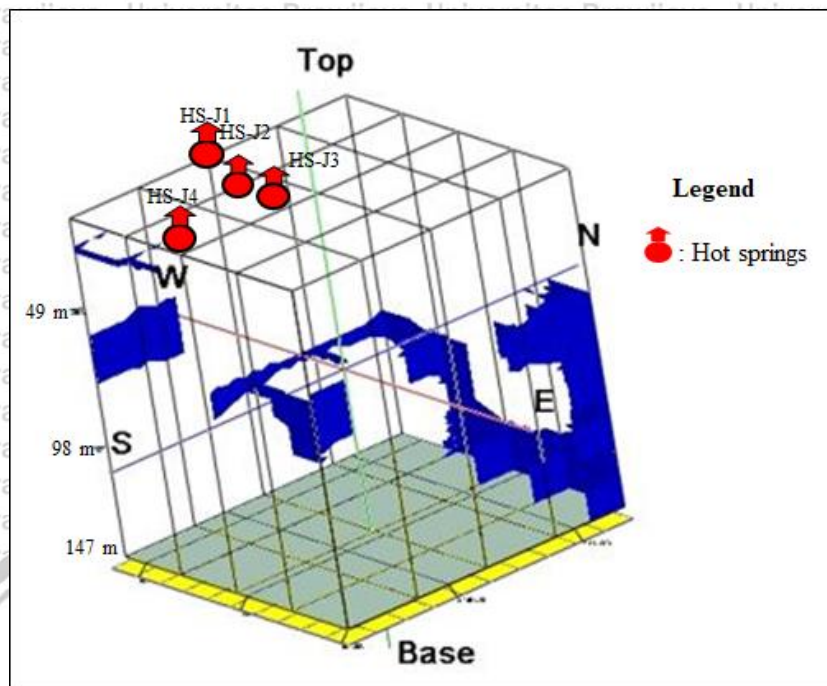
Korelasi nilai resistivitas batuan dan konduktivitas batuan yaitu nilai resistivitas berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas. Konduktivitas dan permeabilitas pada batuan memberikan ruang untuk diisi fluida. Fluida yang mengisi ruang pada batuan memiliki konduktivitas lebih tinggi dari konduktivitas batuan disekitarnya.

Oleh karena itu, keberadaan porositas dan permeabilitas terdapatnya fluida akan memberikan nilai resistivitas yang lebih kecil dari batuan sekitarnya. Jenis fluida juga mempengaruhi harga konduktivitas. Nilai resistivitas rendah diduga berkaitan dengan sumber panas bumi, dimana semakin kecil nilai resistivitas, maka konduktivitas suatu bahan akan semakin besar. Semakin naik suhu, maka nilai

resistivitas batuan semakin berkurang. Sifat alami fluida rendah, yang mengandung mineral akan lebih mudah melepaskan mineral yang terkandung jika suhu bahan meningkat, sehingga mineral tersebut menyebabkan konduktivitas bahan meningkat atau resistivitas bahan menurun.

Diperkirakan lapisan batuan yang mengandung air panas tersebar ke topografi rendah. Sesuai dengan sifat fluida (air) mengalir menuju tempat yang lebih rendah.

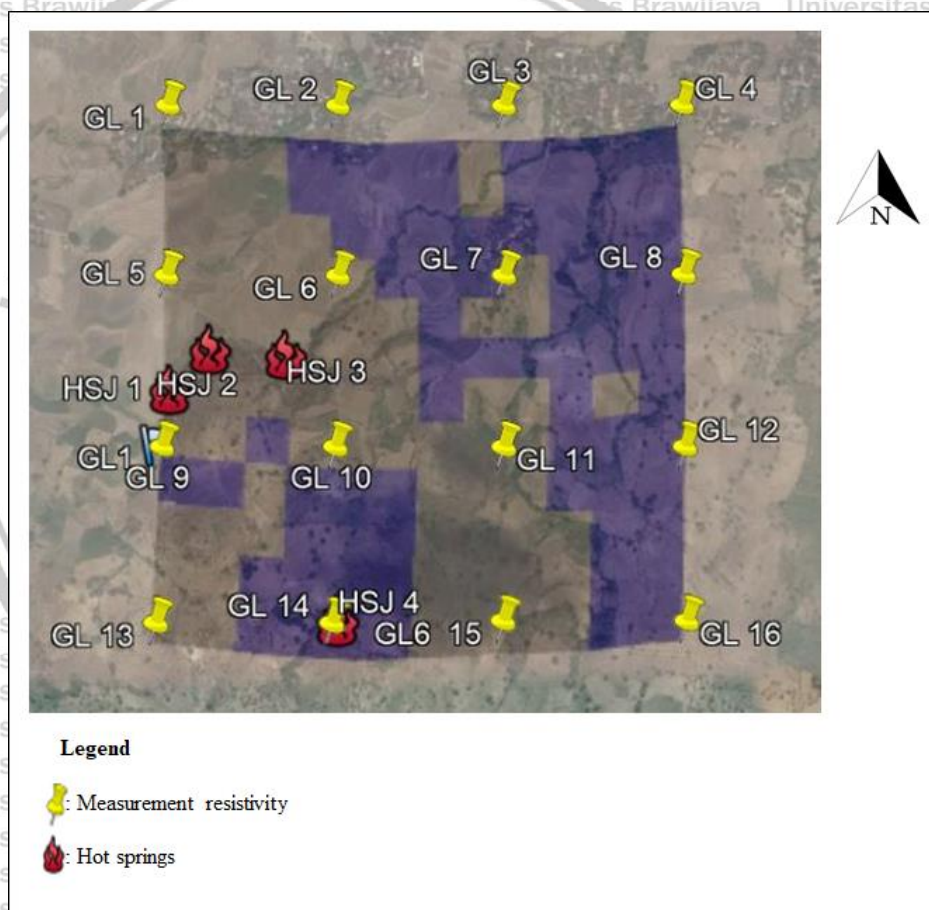
Lapisan air panas diduga sangat berkaitan dengan zona hidrotermal atau fluida yang terbentuk akibat konduksi panas dari tubuh magma. Analisis air panas didasarkan pada kekonduktifan suatu batuan. Dugaan tersebut diperkuat dengan terdapatnya 3 (tiga) manifestasi mataair panas terletak di bagian barat laut yang berdekatan dan terhubung seiring dengan aliran air yang menuju ke bagian timur yaitu pada HS-J1, HS-J2 dan HS-J3. Ketiga manifestasi mataair panas tersebut juga berada pada elevasi yang tidak terlalu signifikan, sedangkan manifestasi mataair panas HS-J4 berada di bagian barat dengan elevasi 270 mdpl. Sesuai dengan sifat fluida (air) yang mengalir ke tempat yang rendah. Model 3D lapisan batuan yang mengandung air panas ditunjukkan pada gambar 5.7.



Gambar 5. 7 Model 3D sebaran lapisan yang mengandung air panas

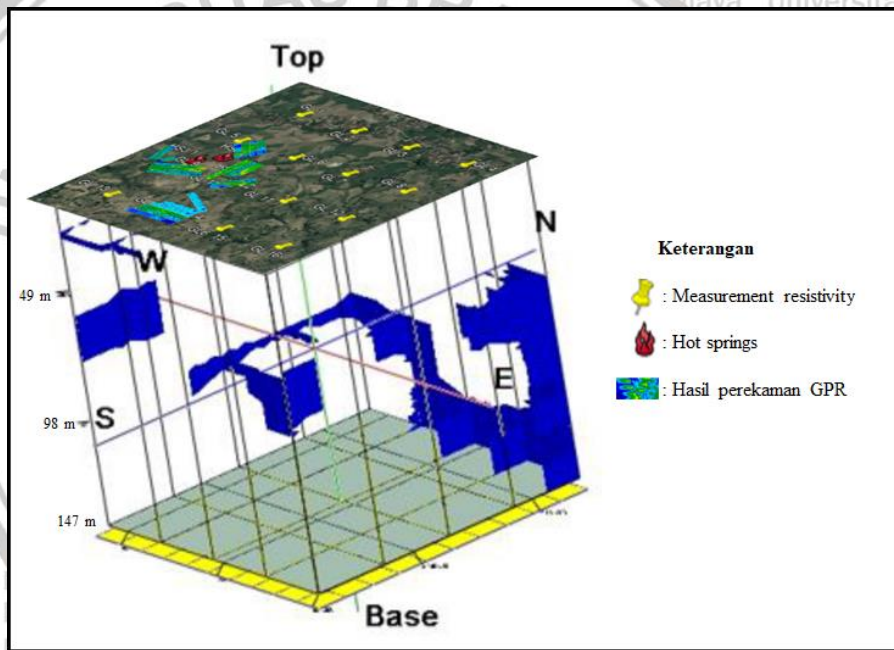
Adanya keterkaitan jenis batuan dengan nilai resistivitas yaitu jenis batuan sedimen, salah satunya adalah batuan lempung pasiran (*clay sand*). Lempung pasiran (*clay sand*) merupakan jenis batuan yang teksturnya agak kasar mengandung 70% pasir, 15% lumpur dan 15% liat, bersifat akuifer dapat melewati air dengan cepat dan mampu menyimpan air. Kemampuan melewati dan menyimpan air tersebut menyebabkan nilai resistivitasnya menurun dibandingkan dengan batuan lainnya yang terdapat di daerah penelitian. Lempung pasiran bersifat plastis dalam kondisi basah atau dapat mengembang pada kondisi kering, dalam kondisi kering lapisan tanah ini menjadi pecah-pecah (Chumairoh, 2014). Mengingat geologi daerah gunung Pandan batuan penyusunnya sebagian besar terdiri dari batuan sedimen seperti lempung karbonat (napal), batu lempung, pasir serta batuan gunungapi yang berasosiasi dengan manifestasi panas bumi.

Kondisi tersebut juga menunjukkan keadaan lokasi penelitian daerah gunung Pandan saat proses akuisisi data, terlihat kondisi permukaan tanahnya kering dan pecah-pecah. Batuan lempung bercampur pasir (*clay sand*) inilah yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan kondisi batuan bawah permukaan yang diinterpretasikan sebagai lapisan yang mengandung air panas. Hasil overlay sebaran batuan yang diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas pada akuisisi data untuk setiap titik VES dapat ditunjukkan pada gambar 5.8.



Gambar 5. 8 Hasil overlay sebaran batuan yang diduga mengandung lapisan air panas pada akuisisi data untuk setiap titik VES

Dari gambar 5.8, terlihat lapisan batuan yang diduga sebagai lapisan batuan yang mengandung air panas berada pada dua lokasi yaitu bagian barat daya dan utara-timur. Di bagian barat daya lokasi penelitian ini, diduga terdapat patahan atau rekahan-rekahan batuan yang memungkinkan fluida dapat keluar melalui rekahan-rekahan batuan yang terdapat di permukaan sebagai manifestasi mataair panas yang terdapat di lokasi penelitian. Hasil pemodelan 3D sebaran air panas dari data resistivitas dan georadar yang terdapat di daerah gunung Pandan yang dioverlay pada lokasi penelitian dapat ditunjukkan pada gambar 5.9.



Gambar 5. 9 Hasil pemodelan 3D pola sebaran air panas dari data resistivitas dan georadar setelah dioverlay pada lokasi penelitian.

Hasil pemodelan 3D dari data geolistrik resistivitas dan georadar terlihat bahwa sebaran air panas bersifat menyebar pada beberapa titik pengukuran, dengan topografi yang rendah. Sifat alami fluida rendah, yang mengandung mineral akan lebih mudah melepaskan mineral yang terkandung jika suhu bahan meningkat,

sehingga mineral tersebut menyebabkan konduktivitas bahan meningkat atau resistivitas bahan menurun. Fluida panas memiliki densitas yang lebih rendah daripada fluida dingin sehingga fluida tersebut cenderung bergerak keatas. Fluida yang bersentuhan dengan panas tersebut bergerak keatas melalui rekahan/*crack* batuan sehingga muncul di permukaan berupa mataair panas.

Lapisan yang mengandung air panas berada pada kedalaman 0,58-147 m berdasarkan hasil interpretasi data resistivitas, sedangkan berdasarkan interpretasi data georadar lapisan yang mengandung air panas berada pada kedalaman 0,07-16,88 m. Lapisan yang mengandung air panas tampak mengelompok dan menyebar.

Pola sebaran air panas yang terbentuk adalah berasal dari barat daya-timur laut, sesuai topografi yang rendah. Hasil penelitian ini juga sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Suciningtyas (2014), di Daerah Blawan-Ijen berdasarkan data resistivitas dan georadar yaitu distribusi sebaran air panas bersifat menyebar mengikuti patahan dan rekahan-rekahan batuan yang ada. Dimana lapisan yang mengandung air panas berada dekat permukaan hingga kedalaman 15 m dengan nilai resistivitas $< 40 \Omega\text{m}$.

Validasi hasil penelitian ini didukung oleh hasil penelitian geofisika menggunakan metode magnetik (Elyusa. 2018), menunjukkan persebaran nilai residual magnetik rendah yang menggambarkan adanya aktivitas panas dibawah permukaan berada pada timur laut dan barat wilayah penelitian. Batuan yang ada disepanjang garis pemodelan merupakan batuan sedimen dimana terdapat beberapa struktur geologi berupa sesar/patahan yang menjadi jalan fluida panas yang berasal

dari batuan reservoir untuk mencapai permukaan. Penggunaan metode gravitasi (Dewi, 2018), menunjukkan adanya anomali tinggi di bagian barat dan anomali rendah di bagian timur laut pada daerah gunung Pandan. Terdapatnya batuan intrusi menunjukkan adanya sesar sekunder sebagai jalannya fluida panas naik ke permukaan. Reservoir hidrotermal menunjukkan pola aliran upflow dan manifestasinya diduga berasal dari batuan sedimen heterogen yang permeabel yang merupakan batuan breksi vulkanik.

Hasil penelitian-penelitian tersebut sesuai dan saling mendukung dengan hasil penelitian menggunakan metode geolistrik resistivitas dan georadar. Nilai susceptibilitas rendah yang diinterpretasikan sebagai reservoir panas bumi gunung Pandan, dianggap sebagai lapisan sumber panas yang dapat memanaskan air pada lapisan dekat permukaan. Reservoir panas bumi pada gunung Pandan juga dianggap sebagai media penghantar panas sehingga air yang dipanaskan keluar melalui rekahan-rekahan/*crack* batuan yang merupakan jalan fluida panas, yang terdapat dipermukaan berupa manifestasi mataair panas sesuai dengan hasil geolistrik resistivitas yang didukung dengan metode georadar.

BAB VI PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Hasil interpretasi 3D struktur bawah permukaan berdasarkan data resistivitas di daerah gunung Pandan menunjukkan rentang nilai dari 1,06-20064,09 Ωm , berada pada kedalaman 0,58-147 m. Terdapat 4 lapisan batuan yaitu:

- a. Lapisan batuan dengan nilai resistivitas $<20 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai lapisan yang mengandung air panas diduga merupakan batuan lempung pasir (*clay sand*). Lapisan yang mengandung air panas berada dekat permukaan hingga kedalaman 114 m.
- b. Lapisan batuan dengan nilai resistivitas antara 20,01-50,00 Ωm diinterpretasikan sebagai lapisan kedap air diduga merupakan batuan tuff.
- c. Lapisan batuan dengan nilai resistivitas antara 50,01-100 Ωm diinterpretasikan sebagai lapisan penyimpan air (*akuifer*) diduga merupakan batu pasir (*sandstone*).
- d. Lapisan batuan dengan nilai resistivitas $>100,01 \Omega\text{m}$ diinterpretasikan sebagai lapisan sumber panas (*source*) diduga merupakan breksi gunungapi.

Hasil interpretasi 3D struktur bawah permukaan berdasarkan hasil perekaman GPR menunjukkan adanya lapisan rongga (*cavity*) diduga sebagai lapisan yang mengandung air panas tersebar pada semua line profil berada dekat permukaan hingga kedalaman 0,07-16,88 m.

2. Pola sebaran air panas berdasarkan data resistivitas dan georadar di daerah gunung Pandan bersifat mengelompok dan menyebar. Pola sebarannya berasal dari barat daya-timur laut.

5.2 Saran

Hasil pola sebaran air panas akan lebih detail jika titik-titik VES lebih banyak tersebar ke arah barat dan selatan dari mataair panas dengan bentangan akuisisi (AB) lebih jauh. Untuk mengetahui gambaran bawah permukaan secara detail sebaiknya interpretasi data dipadukan dengan data bor di daerah penelitian.



DAFTAR PUSTAKA

Arisona. (2009). Migrasi Data Georadar dengan Metode Pergeseran Fasa. *Jurnal Aplikasi Fisika*. 5(1).

Arnata D.P.B., Musa M.D. and Sabhan. (2012). Identifikasi Sistem Panas Bumi Di Desa Masaingi Dengan Menggunakan Metode Geolistrik. *Journal Natural Science*. 1(1).1-6.

Azhari A.P., Rachmansyah A. and Maryanto S. (2016). Interpretation of Bouguer Anomaly to Determine Fault and Subsurface Structure at Blawan-Ijen Geothermal Area. *Journal Neutrino*. 9(1). 1-9.

Badan Standardisasi Nasional. (1998), Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia, Badan Standardisasi Nasional.

Blaricom R.V. (1988). *Practical Geophysics for the Exploration Geologist*. Northwest Mining Association. USA.

Chumairoh I., Susilo A. dan Juwono A.M. (2014). Identifikasi Litologi dan Indikasi Patahan pada Daerah Karangates Malang Selatan dengan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Dipol-Dipol. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Brawijaya. Malang: Jawa Timur. 2(2). *Physics Student Journal*.

Dewi. I.R., Maryato S., Wiyono. dan Susilo. (2019). Interpretation Of Subsurface Structure To Determine The Geothermal System Based On Gravitation Data From Mount Pandan, East Java Indonesia. 5(1). 1-9. *Quest Journals Journal of Research in Environmental and Earth Science*.

Dickson M.B. and Fanelli M. (2004). What is Geothermal Energy Istituto di Geoscienze e Georisorse, Pissa. Italy.

Dickson M.H. dan Mario F. (2005). Geothermal Energy Utilization and Technology, John Wiley & Sonds Ltd, Chichester.

Ditjen EBTKE. (2017). Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1. Jakarta: Direktorat Panas Bumi, Ditjen EBTKE.

Dougherty A.J. and Lynne B.Y. (2015). Utilizing ground penetrating radar to image vents and fractures in geothermal environments. Abstract Volume 13B-2358 presented at 2010 fall meeting, AGU, San Fransisco, California.

Elyusa H.E. (2018). Pendugaan Lokasi, Kandungan Fluida dan Temperatur Reservoir Menggunakan Metode Magnetik dan Geokimia pada Wilayah Gunung Pandan Jawa Timur. Jurusan Fisika. FMIPA. Universitas Brawijaya.Malang.

Ensiklopedia. (2009). Ground Penetrating Radar (GPR). Digilib.ittelkom.ac.id/-agroun-penetrating-radar-gpr&tmpl.

Hadi M.N., Yushantarti A., Suhanto E. dan Sundhoro H. (2007). Penyelidikan Geolistrik dan Head-On Daerah Panas Bumi Sembalun, Kabupaten Lombok Timur-NTB. *Procceding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan dan Non Lapangan Tahun 2007-Pusat Sumber Daya Geologi.*

Haerudin N., Pardede V.N. dan Rasimeng, S. (2009). Analisis Reservoir Daerah Potensi Panasbumi Gunung Rajabasa Kalianda dengan Metode Tahanan Jenis

dan Geotermometer. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung. 10(2). 141-146. *Jurnal Ilmu Dasar*.

Hamid M.I. (2010). Aplikasi Metode Geolistrik Tahanan Jenis Konfigurasi Schlumberger Untuk Menentukan Letak dan Kedalaman Akuifer Air Tanah di Desa Labulewa Boawae Kabupaten Nagekeo Nusa Tenggara Timur. Jurusan Fisika UB, Malang.

Hutapea F. (2010). Ekplorasi Panas Bumi Dengan metode Geofisika dan Geokimia Pada Daerah Bonjol, Kabupaten Pasaman Sumatera Barat. *Geologi.digilib.itb.ac.id.ITB. Bandung*.

Irawansyah H. (2009). Pendugaan Lapisan Akuifer Pada Eksplorasi Air Bawah Tanah Dengan Metode Resistivitas Konfigurasi Schlumberger (Studi Kasus Kecamatan Wawewa Barat P. Sumba). Jurusan Fisika FMIPA. Universitas Brawijaya Malang.

Lenat J.F. (1995). Resistivity in Volcanic Regions. <http://ghp712.geo.unileipzig.de./geosf/research/ERT/volcress.html>.

Maghfiroh I. (2010). Studi potensi Longsor Plengsengan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Brantas Kelurahan Oro–Oro Dowo Kecamatan Klojen Kota Malang dengan Menggunakan Ground Penetrating Radar (GPR).

Mardiana M.A., Rusman S. dan Syamsuddin. (2014). Struktur Geologi Sulawesi Barat Ditinjau Dari Kelurusan Geomorfologi Regional. *Procidding Seminar Nasional Geofisika 2014*.

Maryanto S., Suciningtyas I.K.L.N., Dewi C.N. and 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*. 1-14.

Mujiwinarni P. (2016). Lokalisir Rongga (Cavity) Bawah Permukaan di Kota Malang Berdasarkan Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR).

Pringgoprawiro H. dan Sukido (1992). Peta geologi Bojenogoro. P.1

Rakhman H.A. (2012). Pendugaan Sebaran Lapisan Akuifer dengan Metode Geolistrik VES di Kabupaten Pasuruan Bagian Barat dan Timur. Jurusan Fisika. FMIPA. Universitas Brawijaya Malang.

Rakhmanto F., Maryanto S. dan Susilo, A. (2011). Tomografi Geolistrik Daerah Sumber Air Panas Cagar Batu Komplek Arjuno- Welirang. *Natural B.* 1(2). ISSN: 2088-4613.

Ravindran A. dan Pranh M.A.K. (2012). Graoundwater Exploration Study Using Wenner-Schlumberger Electrode Array Through W-4 2D Resistivity Imaging System at Mahapallipuram, Chennai, Tamilanadu, India. *Research Journal of Recent Sciences*. 1(11). 36-40.

Reynolds J.M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. United State of America: John Wiley & Sons.

Robinson C. (1988). Basic Exploration Geophysics, John Willey and Son Inc., Cananda.

Rohmah S.A., Maryanto S. dan Susilo A. (2018). Identifikasi Air Tanah Daerah Agrotechno Park Cangar Batu Jawa Timur Berdasarkan Metode Geolistrik Resistivitas. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 14(1).5-11.

Saemundsson Kristanji. (2009). *Geothermal Systems in Global Perspective*. Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources. UNU-GTP, Kenya.

Santoso D. 2002. *Pengantar Teknik Geofisika*. Bandung: ITB Press.

Santoso R.W., Sholichin M., Primantyo A. dan Maryanto S. (2012). Identifikasi Arah Aliran Bawah Permukaan dengan Metode Geolistrik dan GPR (Ground Penetrating Radar) di Kota Batu. *Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang*. Jawa Timur.

Schon J.P. (1998). *Physical Properties of Rock: Fundamental and Principles of Petrophysics* Pergamon. Leoben.

Subchi C.T. (2010). *Pendugaan Daerah Discharge Air Desa Nangadoro dengan Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Schlumberger (Studi Kasus Zona Panasbumi Hu'u, Kabupaten Dompu, Nusa Tenggara Barat)*. *Fisika UB*. Malang.

Suciningtyas I.K.L.N., Maryanto S. dan Rachmasyah A. (2014). *Pendugaan Sebaran Air Panas dengan Metode Resistivitas dan Georadar di Daerah Blawan-Ijen Jawa Timur*. Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang.

Telford W. and Sheriff. (1982). *Applied Geophysics*. London: Cambridge University Press.

Telford W.M. (1982). Applied Geophysics. London: Cambridge University Press.

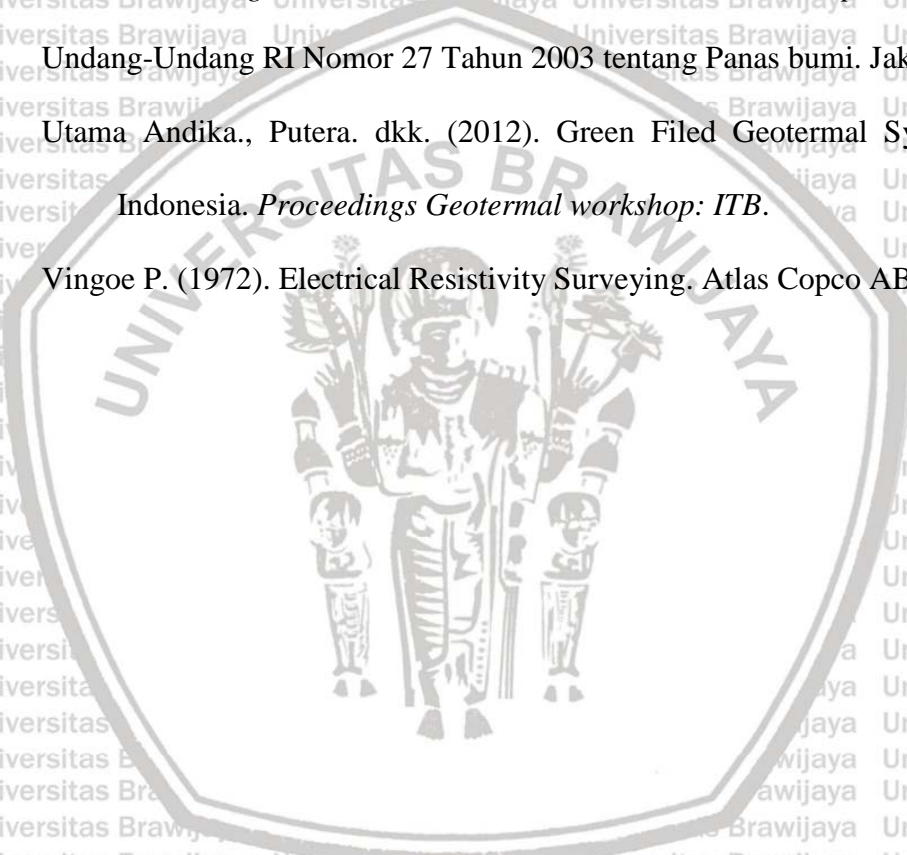
Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R. E. (1976). Applied Geophysics, 2nd edition, Cambridge University Press, New York.

Thoha M., Parman P., Prastistho B. and Yudiantoro D.F. (2014). Geology and Geothermal Manifestations of Mount Pandan, East. Bandung: Indonesia. *Proceedings, 3rd International ITB Geothermal Workshop Bandung.1-13.*

Undang-Undang RI Nomor 27 Tahun 2003 tentang Panas bumi. Jakarta.

Utama Andika., Putera. dkk. (2012). Green Filed Geotermal System in Java, Indonesia. *Proceedings Geotermal workshop: ITB.*

Vingoe P. (1972). Electrical Resistivity Surveying, Atlas Copco ABEM.





LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

L1. 1 PUBLIKASI ILMIAH



IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 6 Issue 5, May 2019

ISSN (Online) 2348 - 7968

www.ijset.com

3D Vertical Electrical Sounding (VES) At Mount Pandan Hot Springs Area, East Java, Indonesia

Orieni Y. K. Teftae¹, Sukir Maryanto^{2*} and Didik Rahadi Santoso³

¹ Magister Program, Department of Physics, Universitas Brawijaya, Malang 65415, East Java, Indonesia

² Brawijaya Volcano and Geothermal Research Center, Universitas Brawijaya, Malang 65415, East Java, Indonesia

³ Measurement and Circuit System Laboratory, Universitas Brawijaya, Malang 65415, East Java, Indonesia

Abstract

ID measurement had been carried out using Schlumberger configuration in geothermal area of mount Pandan, East Java, Indonesia to identify patterns of hot water distribution. Data acquisition was conducted at 16 points of VES (Vertical Electrical Sounding) with a grid research design covering hot water manifestations. The resistivity value obtained from the results of data processing was ranged from 1.06 Ω m to 20064.09 Ω m. The interpretation of data ID in geoelectrical resistivity was obtained by depth and type of resistivity values. The layer containing hot water was estimated to be in clay sand with a resistivity value <20.00 Ω m, the water-resistant layers were estimated to be in tuff rock with a range of resistivity values from 20.01-50.00 Ω m, the aquifer layers were estimated as sandstone with a range of resistivity values from 50.01-100.00 Ω m and hot springs layers were predicted as volcanic breccia with a resistivity value >100.01 Ω m. 3D modeling interpretation displayed the patterns of hot water distribution that had been evenly clustered and spread. The patterns of the distribution came from the southwest to the northeast area.

Keywords: Hot Water, Mount Pandan, Geoelectric, Resistivity, VES, Schlumberger.

1. Introduction

Geothermal is one of the renewable and eco-friendly alternative energies. In addition, its presence in Indonesia is very abundant, considering that Indonesia has many volcanoes. Based on the data, one of the geothermal energies that is estimated to have considerable potential in Java is the area of mount Pandan, precisely located in Bojonegoro Regency, East Java, and is predicted to have manifestation of geothermal energy around 60 MWe with a surface temperature of more than 35°C [1]. This is evident by the emergence of hot springs in Banyukuning and Jari (Selo Gejahl) area. Mount Pandan area is a volcanic area included in Kendeng lane in the southern part. It consists of roughly shaped hills with slightly sloping steep, reaching 150 m to 897 m height. Its constituent rocks consist of sediments rocks such as carbonate clay, clay rock, sand and volcanic rocks associated with geothermal

manifestations in the form of warm springs and alteration rocks. Mandala Kendeng has young volcanic rocks of late pliocene containing lava deposits [1], [2].

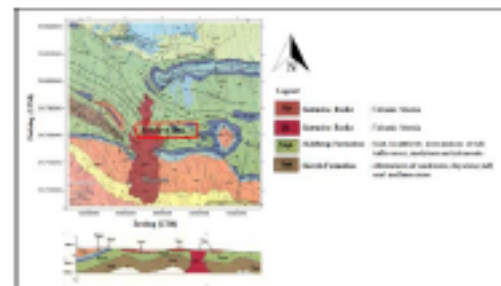


Fig. 1 Geological Map of Bojonegoro Region [2]

The geological structure at mount Pandan geothermal area is in the form of topographical alignment, river alignment, hot spring appearance, and primary data in the field is in the form of lithological offsets and cesarean breccias. Based on these conditions there are two types of geological structures that develop, namely normal faults and horizontal faults. In general, the orientation of the geological structure at mount Pandan area is predominantly northeast and northwest-southeast, although there are several faults with relatively east-west direction [1], [2]. A unit that cannot be separated from geothermal systems is a source of heat energy contained in hot water, water vapor, and rocks along with other related minerals. Geothermal is renewable, relatively eco-friendly energy which has great potential and can reduce national energy dependence on fuel oil [3].

Geothermal investigation related to the patterns of hot water distribution has a significant relationship with the structure and manifestation of geothermal energy that can be done by subsurface investigation using geophysical methods. One suitable geophysical method to determine subsurface conditions is to use the geoelectrical resistivity method [4]. The method is active by injecting the flow



through an electrode responded by a potential electrode. The difference in the subsurface layer will give varying resistivity values [5].

Based on the purpose, the geoelectrical methods are divided into two; sounding and mapping methods [4]. Sounding method is used to see the differences in rock resistivity vertically downward, usually using Schlumberger (VES) configuration. It provides detailed information of conductive zones, actual resistivity values and thicknesses. Mapping method is used to see the differences in lateral rock resistivity [6]. Initial surveys performed in the manifestations of mount Pandan showed that there were hot springs that turn on the surface out. The hot springs were clustered and came close together which became an early indication of geothermal potential in the area. Geothermal research related to the estimation of hot water distribution in the geothermal area of mount Pandan had not been yet found out. The direction of the distribution needs to be done as an initial step to estimate the geothermal potential in the area.

2. Materials and Methods

The research was conducted in a village called Jari, Gondang District, Bojonegoro Regency, East Java. The tool was a set of OYYO type McOlm-EL resistivity meter. Geophysical exploration was carried out by the geoelectrical resistivity methods to obtain an overview of the subsurface structure of the earth [7]. The acquisition of Schlumberger (VES) configuration was designed in the form of a grid covering spring manifestations, as shown in Fig 2. The number of acquisition consists of 16 VES points, with the distance among the VES points was 300 m, the line length of the Schlumberger configuration was 210 m with the flow electrode space AB/2.

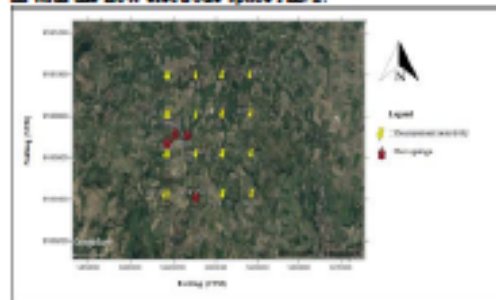


Fig. 2 Survey design map for the acquisition of geoelectrical resistivity data

The data was corrected for field geometrical correction according to the distance or line space [8]. The data processing was divided into 2 (two) stages:

1. 1D data processes. The inversion data was carried out to determine the type of inversion model and data interpretation for subsurface structures from sounding point observation data [9]. After analyzing the resistivity values of the constituent rocks of each layer, the model of the presence of hot water layers at each VES point was then predicted. The 1D model of the presence of hot water layers is shown in Fig 2.
2. 3D data processes. The processing of 1D would be correlated with sounding points to get a cross section of rock lithology resulting in 3D modeling [10]. Fig 4 shows the description of subsurface conditions at mount Pandan area. Each VES point was interpolated to see the similar conditions under the surface. The low resistivity values obtained at each VES point were then grouped and interpreted to identify the patterns of hot water distribution [7]. Fig 3 show the value of material resistivity in the model based on the measurement results was matched with the material resistivity values according to the references to determine if there is suitability [11].

The process of data interpretation was performed by checking the contrast of 3D model-based rock resistivity. Besides, referring to the information can describe the geological model of the research area which is then adjusted to the general rock geology literature [12]. From the results of inversion, the resistivity data was made by the boundary of the soil layers by looking at the tendency of color which indicates the value of resistivity. The results of the interpretation obtained from the contrast of these types of prisoners can provide a physical depiction of the rock [5]. Based on the model, the aquifer distribution and faults as manifestations of hot springs, the direction of its flow and distribution could be estimated [6].

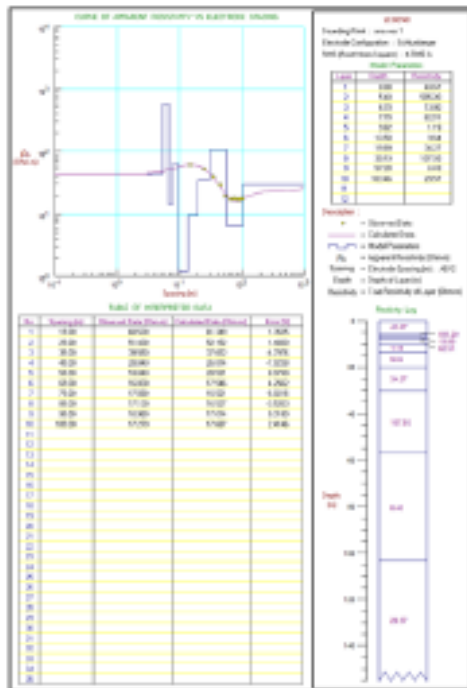


Fig. 3 Results of ID inversion at VES points

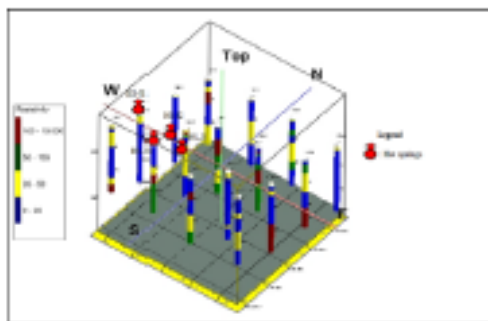


Fig. 4 Results of the interpolation of VES point

3. Results and Discussion

Geothermal manifestations, in the form of hot springs at mount Pandan, there are four hot springs that is hot springs Jari 1 (HS-J1), hot springs Jari 2 (HS-J2), hot springs Jari 3 (HS-J3) and hot springs Jari 4 (HS-J4) with a temperature 30°C, 40° C, 48°C and 58° C. Hot springs Jari 1 (HS-J1) and hot springs Jari 4 (HS-J4) are right at point VES 9 and point VES 14. Hot springs Jari 2 (HS-J2) and hot springs Jari 3 (HS-J3) are located ± 100 m from point VES 9. The hot springs come out through rock fractures that are clustered and come close together.

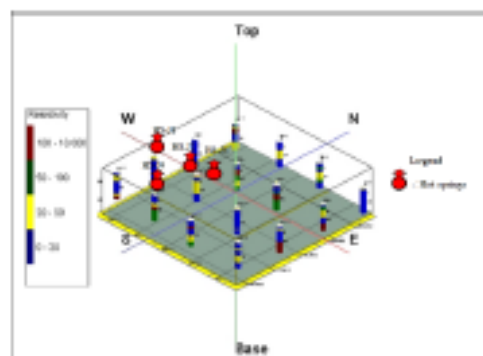


Fig. 5 3D modeling of VES data

Point VES 1 shows the resistivity values ranged from 1.19 Ωm to 585.20 Ωm with 103.46 m depth. The layers containing hot water was also found in 9.62 m, 13.50 m and 57.19 m depth with the resistivity value <20.00 Ωm. While the layers of the hot hot spring was located under the water proof layer and the layer containing hot water. Rock outcrops (*boldor*) which are thought to be volcanic rocks resulting from erosion and river flow sedimentation was also found at point VES 1. At point VES 6, it shows the resistivity values ranged from 1.11 Ωm to 3556.87 Ωm with 123.86 m depth. It is suspected that there was a layer containing hot water at 6.34 m depth with the resistivity value <20.00 Ωm. This is proven by the presence of the hot hot springs layer beneath the layer containing the hot water. This is also evident by the presence of hot springs Jari 3 (HS-J3) within ± 25 m from the point VES 10 with a temperature 48°C.

At point VES 7, it shows resistivity values ranged from 5.36 Ωm to 108.45 Ωm at 111.26 m depth. It was predicted that there is a layer containing hot water with a resistivity value < 20.00 Ωm in 9.06 m, 18.52m and 25.98 m depth, and also there are crossings of aquifer layers and



hot spring layers. This is evident by the presence of hot springs coming out through rock fractures around the point VES 7 at ± 50 m apart. Besides, there was a hot spring layer evident by the presence of volcanic rock outcrops thought to be volcanic rocks in 4.29 m and 57.06 m depth [13]. VES 8 point shows the resistivity values ranged from 1.21 Ω m to 111.98 Ω m with 103.91 m depth. It is suspected that there are crossing layers containing hot water, impermeable layers, aquifer layers and hot spring layers. The layer containing hot water was found 10.98-16.65 m and 68.92 m depth with the resistivity value <20.00 Ω m. It is also evident that there is a hot spring layer in 103.91 m depth, so the hot water comes out through rock fractures.

Point VES 9 showed a low resistivity value ranged from 1.14 Ω m to 54.42 Ω m in 126.71 m depth. Allegedly, there were aquifer layers, water-resistant layers and layers containing hot water. At a depth of 18.62-126.71 m, there was a layer containing hot water, this is evident by the presence of hot springs Jari 1 (HSJ1) in the surface with a temperature 50°C right at the point of data acquisition resistivity. The hot layer appears through rock fractures. Although there were no hot hot spring layers at point VES 9, it is likely that the hot hot spring layers were below 126 m depth. Point VES 9 was right in the west side of point VES 10, where there was a hot spring layer at point VES 10. The hot water flow is thought to originate from the point VES 10 to point VES 9 which has a lower topography. VES 10 point showed the resistivity values ranged from 3.39 Ω m to 106.84 Ω m in 102.55 m depth. It is suspected that there were water-resistant layers, layers containing hot water, aquifer layers and hot spring layers. There was a layer containing hot water with a resistivity value of <20.00 Ω m in 16.89 m depth. This is also evident by the presence of hot springs Jari 2 (HS-J2) within ± 100 m from the point VES 9 with a temperature 40°C. The resistivity values ranged from 2.90 Ω m to 470 Ω m at a depth of 132.60 m at point VES 12. There were aquifer layers, impermeable layers, layers containing hot water and hot spring layers. There are also layers containing hot water with resistivity value <20.00 Ω m in 2.98 m, 8.66 m and 23.10 m.

At point VES 13, the resistivity value ranged from 3.94 Ω m to 116.63 Ω m in 128.78 m depth. It is suspected that there were water-resistant layers, layers containing hot water and hot spring layers. In 6.62-12.17 m depth, precisely in 46.41 m depth there were also layers containing hot water with a resistivity value of <20.00 Ω m. At point VES 14, the resistivity value ranged from 1.38 Ω m to 450.98 Ω m with 142.79 m depth. It is suspected that there were water-resistant layers, layers containing hot water, aquifer layers and hot spring layers. There was a layer containing hot water in 1.47-29.71 m

depth with a resistivity value <20.00 Ω m. This is evident by the presence of hot springs on the surface through rock fractures with a temperature 58°C. At point VES 14, there were also outcrops of diffuse volcanic rocks [13]. At point VES 15, the resistivity values ranged from 1.93 Ω m to 200064.09 Ω m in 120.37 m depth. It is suspected that there were water-resistant layers, aquifer layers, layers containing hot water and springs layers. Also, there was a layer containing hot water in 4.92-21.76 m and 51.08 m depth with a resistivity value <20.00 Ω m.

Based on the results of 3D interpretation and modeling, it can be seen that the resistivity value <20.00 Ω m as the dominant layer containing hot water was at 10 points VES namely VES 15, VES 14, VES 13, VES 12, VES 10, VES 9, VES 8, VES 7, VES 6, and VES 1. The hot springs came out through rock fractures. There are 6 VES points, namely point VES 16, VES 11, VES 5, VES 4, VES 3 and VES 2, there was a small possibility that there is a layer containing hot water since no hot spring layers found. Based on 3D modeling in figure 6, it is clear that the layers containing hot water appeared to cluster and spread. The conditions in the field also show that there were hot springs appearing through rock fractures that were clustered and closed together. There were also several VES points along the river with a low topography. In accordance with the fluid nature of water flowing from the high place to the low one, the patterns of hot water formed in the field was originating from the northwest to the northeast area.

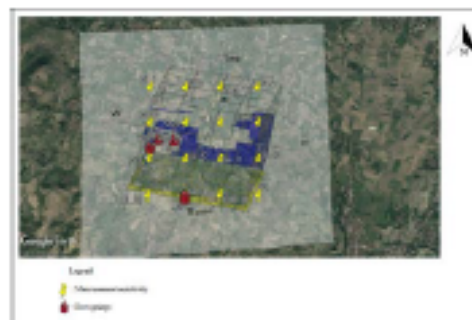


Fig. 6 The results of 3D modeling of the patterns of hot water distribution overlaid in the research area

In general, based on the results of 3D modeling in Fig 5 and Fig 6, it reveals that resistivity values ranges from 1.06 Ω m to 200064.09 Ω m. The resistivity value <20.00 Ω m indicated by blue color, that was thought to be the type of layers containing hot water, resistivity value ranged from 20.01-50.00 Ω m with yellow and suspected as a type of water-resistant layer with resistivity value



ranged from 50.01–100.00 Ωm with green color, It was thought as aquifer layers and resistivity value > 100.01 Ωm with red color that was suspected to be the hot spring (volcano). The layers were thought to be clay sand, sandstone, tuff and breccia. Given the geology of mount Pandan area, there are volcanic rocks in the form of volcanic breccia, crustal formation, namely crossing sandstone, clay, tuff, marl and limestone as well as Kalibeng formation in the form of marl, local tuff inserts, and sandstone [2], [13].

4. Conclusion

The results of 3D geoelectrical resistivity interpretation at mount Pandan area showed the presence of hot springs distribution. The layers containing hot water was thought to be in clay sand with the resistivity value < 20.00 Ωm . The water-resistant layers were thought to be in tuff rocks with resistivity values ranged from 20.01–50.00 Ωm , the aquifer layers were thought to be sandstone with resistivity values ranged from 50.01–100.00 Ωm and the hot spring layers were also suspected as volcanic breccia with resistivity values > 100.01 Ωm . The patterns of hot water distribution at mount Pandan area had been evenly clustered and spread. The distribution patterns originated from the northwest to the northeast area.

Acknowledgments

Authors thanks to Brawijaya Volcano and Geothermal Research Center, Faculty of Mathematics and Natural Science, University of Brawijaya Malang, East Java, that partially financial supported of data acquisitions at mount Pandan geothermal area.

References

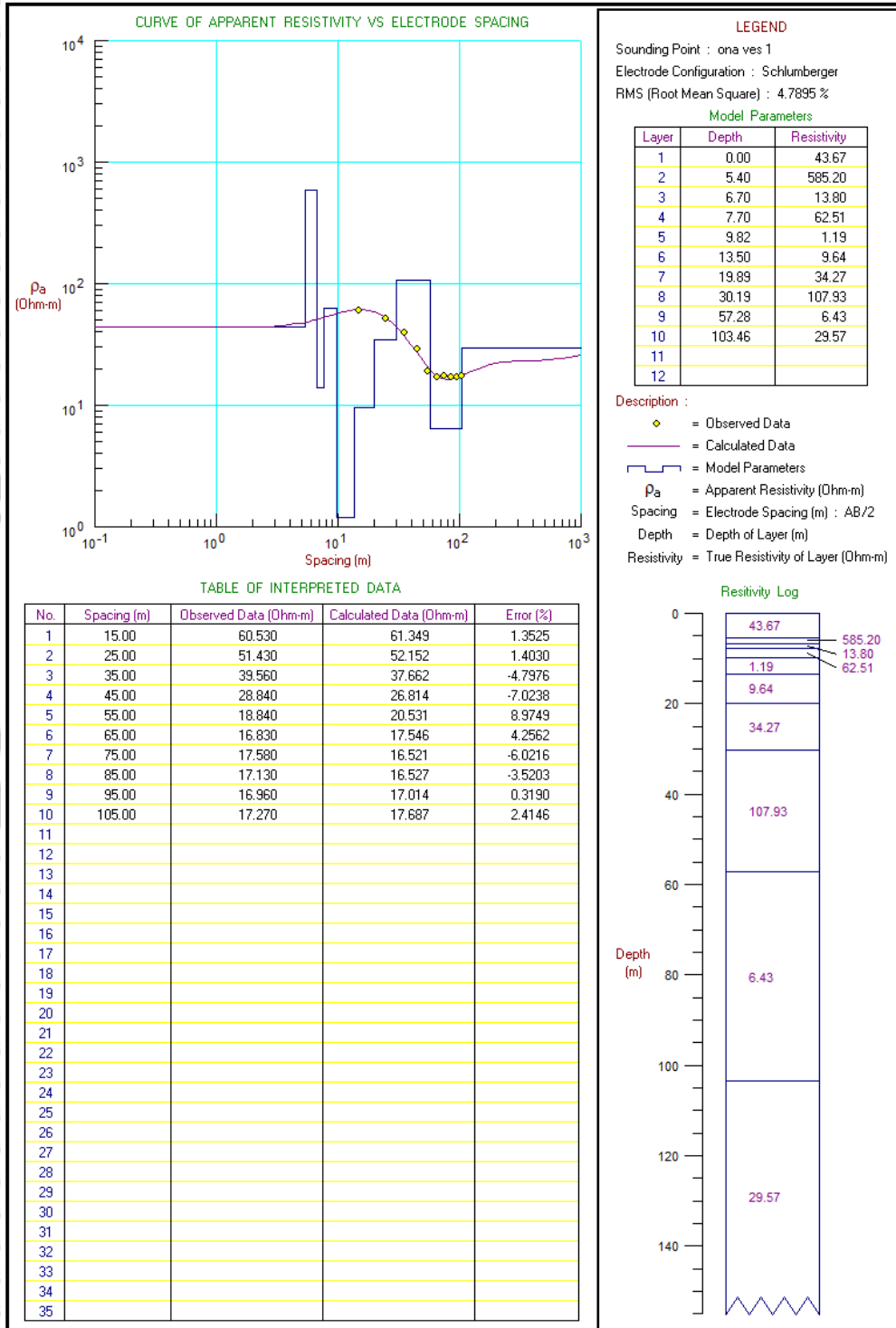
- [1] Ditjen EBTKE. (2007). Indonesian Geothermal Potential. Jakarta: Ministry of Energy and Mineral Resources. 1. (In Indonesian)
- [2] Pringgoprawiro H. and Sukido. (1992). Geological Map of Bojonegoro, Scale 1:100.000. (1). (In Indonesian)
- [3] Azhari AP, Rachmansyah A, Maryanto S. (2016). Interpretation of Bouguer Anomaly to Determine Fault and Subsurface Structure at Blawan-Ijan Geothermal Area. *Journal Neutrino*. 9(1). 1-9.
- [4] Telford WM, Goldart LP, Sheriff RE. (1976). *Resistivity Methods*. Cambridge: Cambridge University Press. 3. 523-576.
- [5] Maryanto S, Suciningtyas IKN, Chinantya ND, Rachmansyah A. (2016). Integrated Resistivity and Ground Penetrating Radar Observations of

- Underground Seepage of Hot Water at Blawan-Ijan Geothermal Field. *International Journal of Geophysics*. (1). 1–14.
- [6] Rakhmanto F, Maryanto S, Susilo A, Krishiantoro A. (2007). ERT (*Electrical Resistance Tomography*) on Cangar Hot Springs Complex Mount Arjuno-Welirang. FMIPA University of Brawijaya Malang, East Java. Thesis Department of Physics, University Of Brawijaya. (In Indonesian)
- [7] Afandi A, Cetravardama IGNB, Maryanto S, Nafhir A, Zaman MB, Pambudi A.P. (2018). Identification of Reservoir Thickness of Ijan (Geothermal Prospect Area, Indonesia) Using Resistivity Method With Schlumberger Configuration. *International Journal of GEOMATE*. 15(52). 68-75.
- [8] Abdullahi MG, Toriman ME, Gasim MB. (2014). The Application of Vertical Electrical Sounding (VES) for Groundwater Exploration in Tudun Wada Kano State, Nigeria. *Journal Of Geology and Geophysics*. 2(4). 51-55.
- [9] Rohmah SA, Maryanto S, Susilo A. (2017). Identification of Groundwater in the Agrotechno Park Cangar Botm Area in East Java Based on Geoelectrical Resistivity Method. *Journal Of Physics and ITS Applications*. 14(1). 5-11. (In Indonesian)
- [10] Bashir I, Izham M, Main R. (2014). Vertical Electrical Sounding Investigation of Aquifer Composition and Its Potential to Yield Groundwater in Some Selected Towns in Bida Basin of North Central Nigeria. *Journal Of Geography and Geology*. 6(1).
- [11] Iserhien RE, Emekwem. (2014). Vertical Electrical Sounding of Water-Bearing Sub-Surface of Isale-Azagba in Southern Nigeria. *Natural Resources*. 5(12). 772-781.
- [12] Arnata DPB, Musa MD, Sahhan. (2012). Identification of Geothermal System in Village Masangi use the Geoelectrical Method. *Journal Natural Science*. 1(1). 1-6. (In Indonesian)
- [13] Thoha M, Purnan P, Prastisbo B, Yudiantoro DF. (2014). Geology and Geothermal Manifestations of Mount Pandan, East Bandung, Indonesia. *Proceedings, 3rd International ITB Geothermal Workshop Bandung*. 1-13.

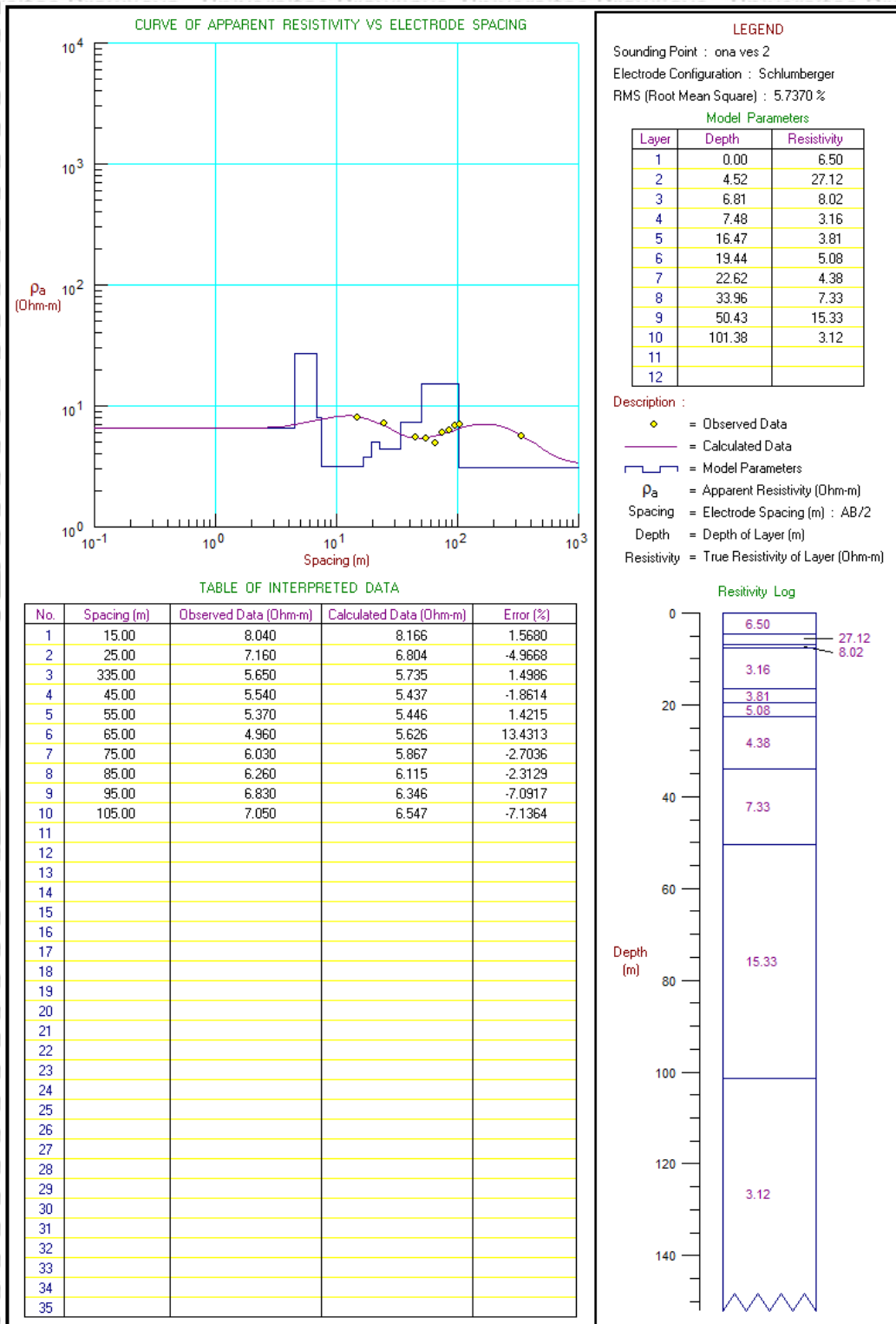


LAMPIRAN 2

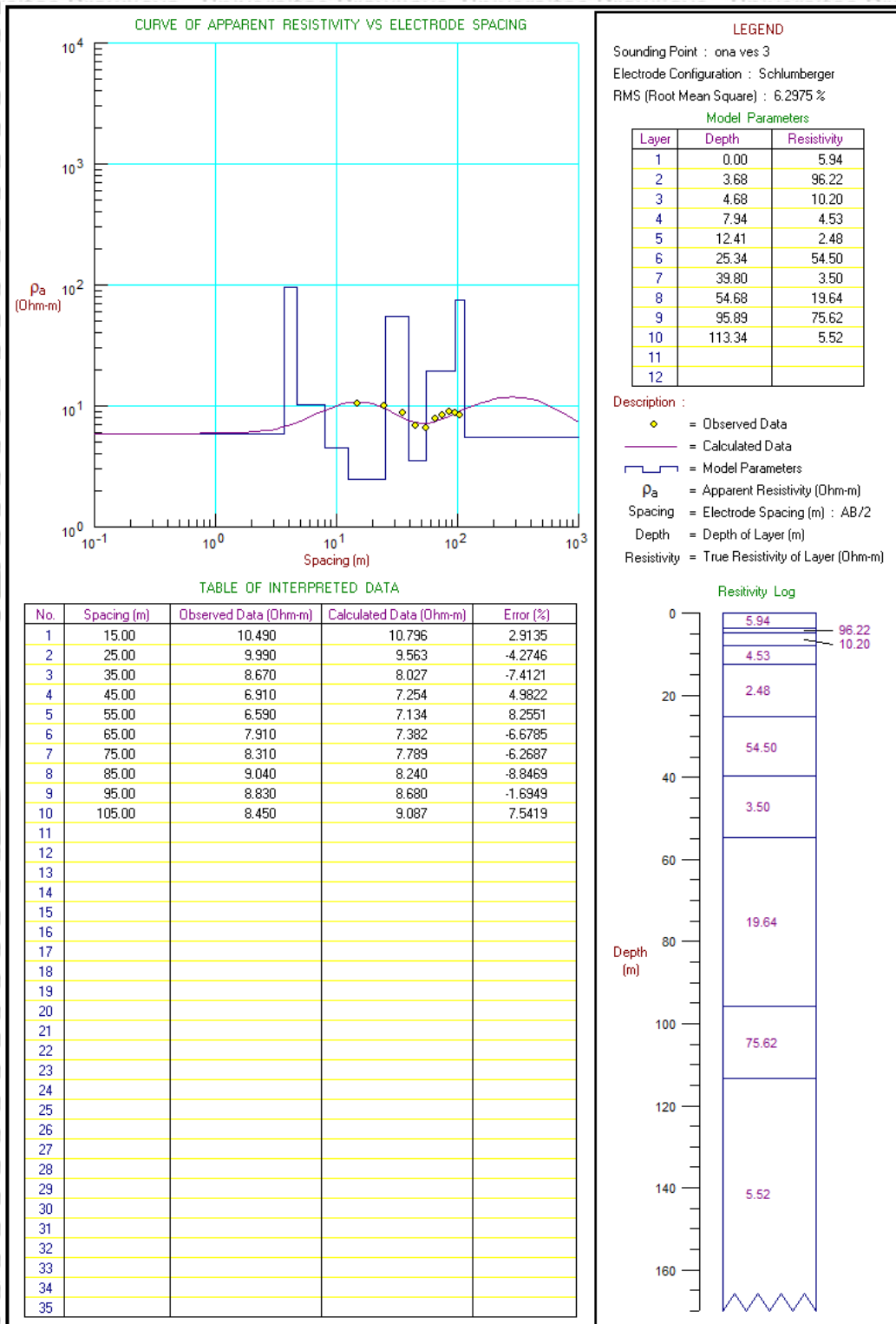
HASIL PENGOLAHAN DATA RESISTIVITAS PADA SETIAP TITIK VES



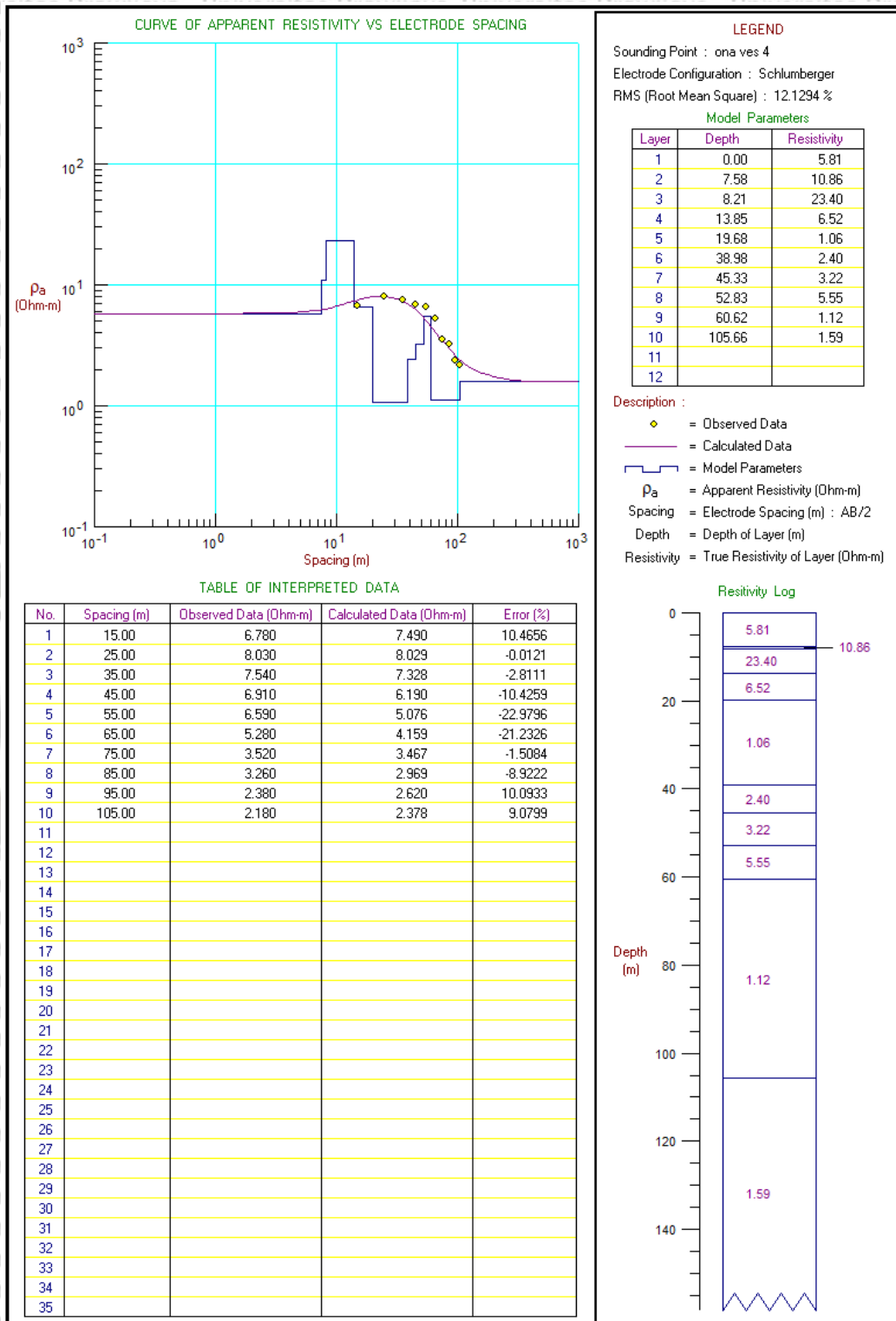
L2. 1 Hasil pengolahan data pada titik VES 1



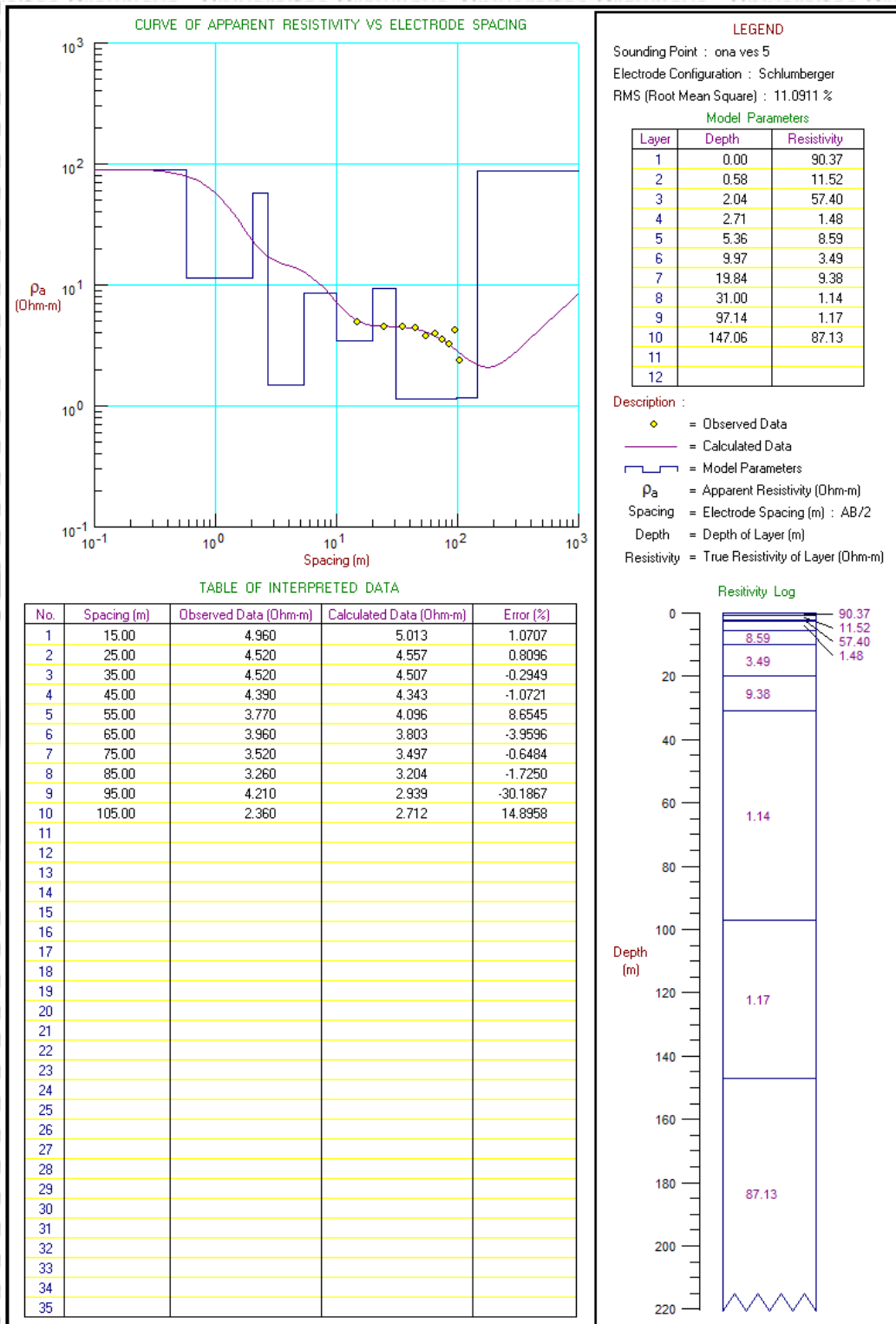
L2. 2 Hasil pengolahan data pada titik VES 2



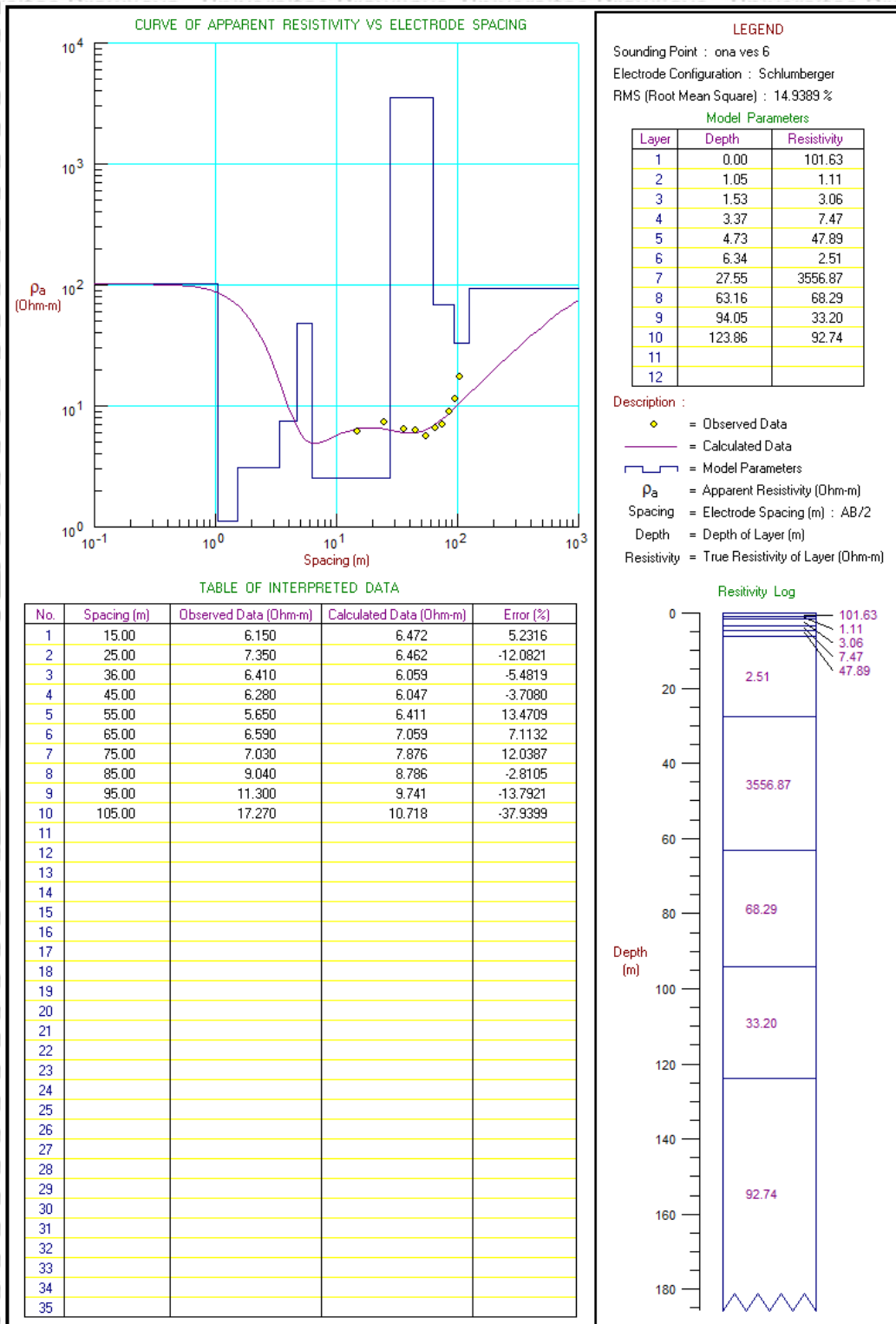
L2. 3 Hasil pengolahan data pada titik VES 3



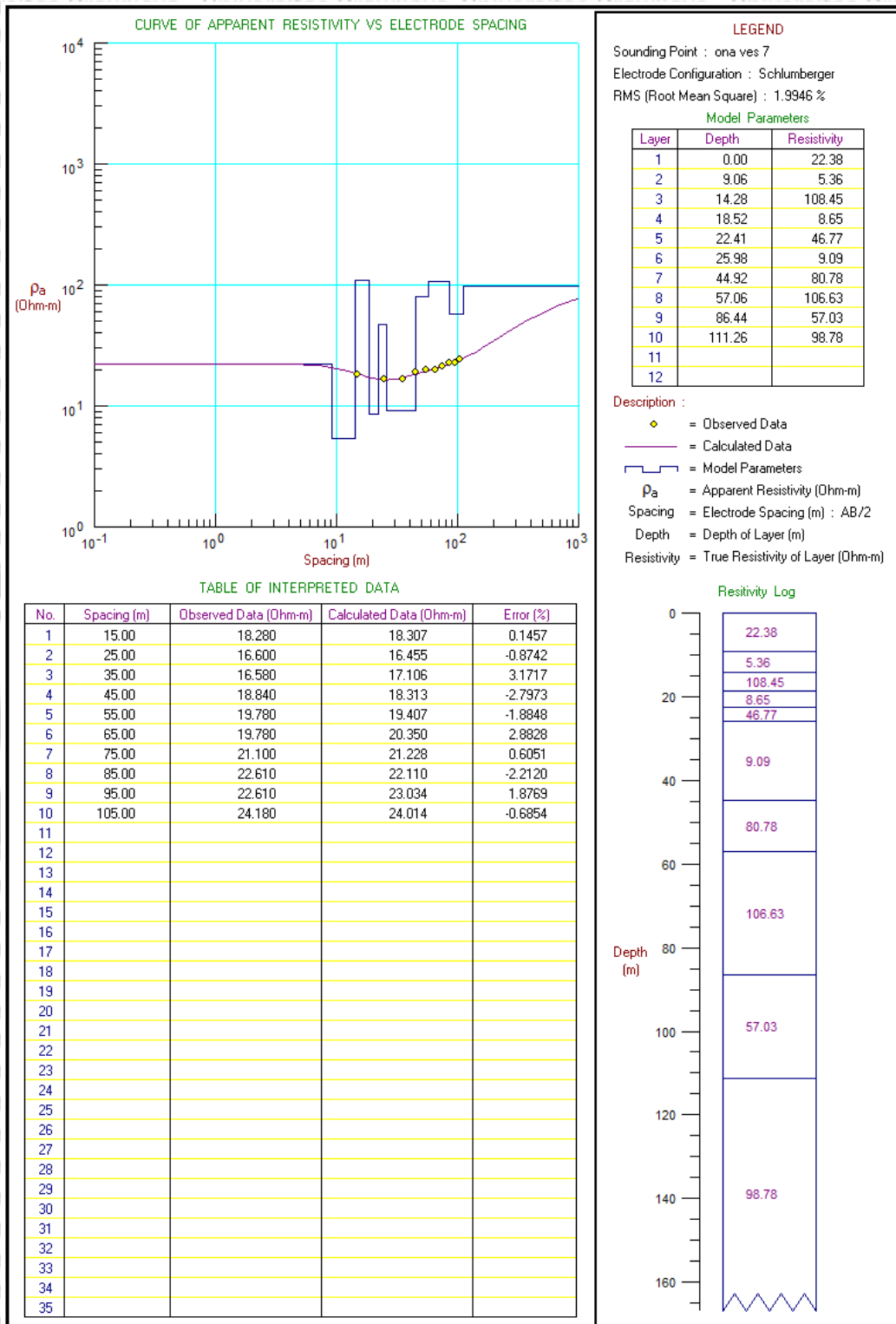
L2. 4 Hasil pengolahan data pada titik VES 4



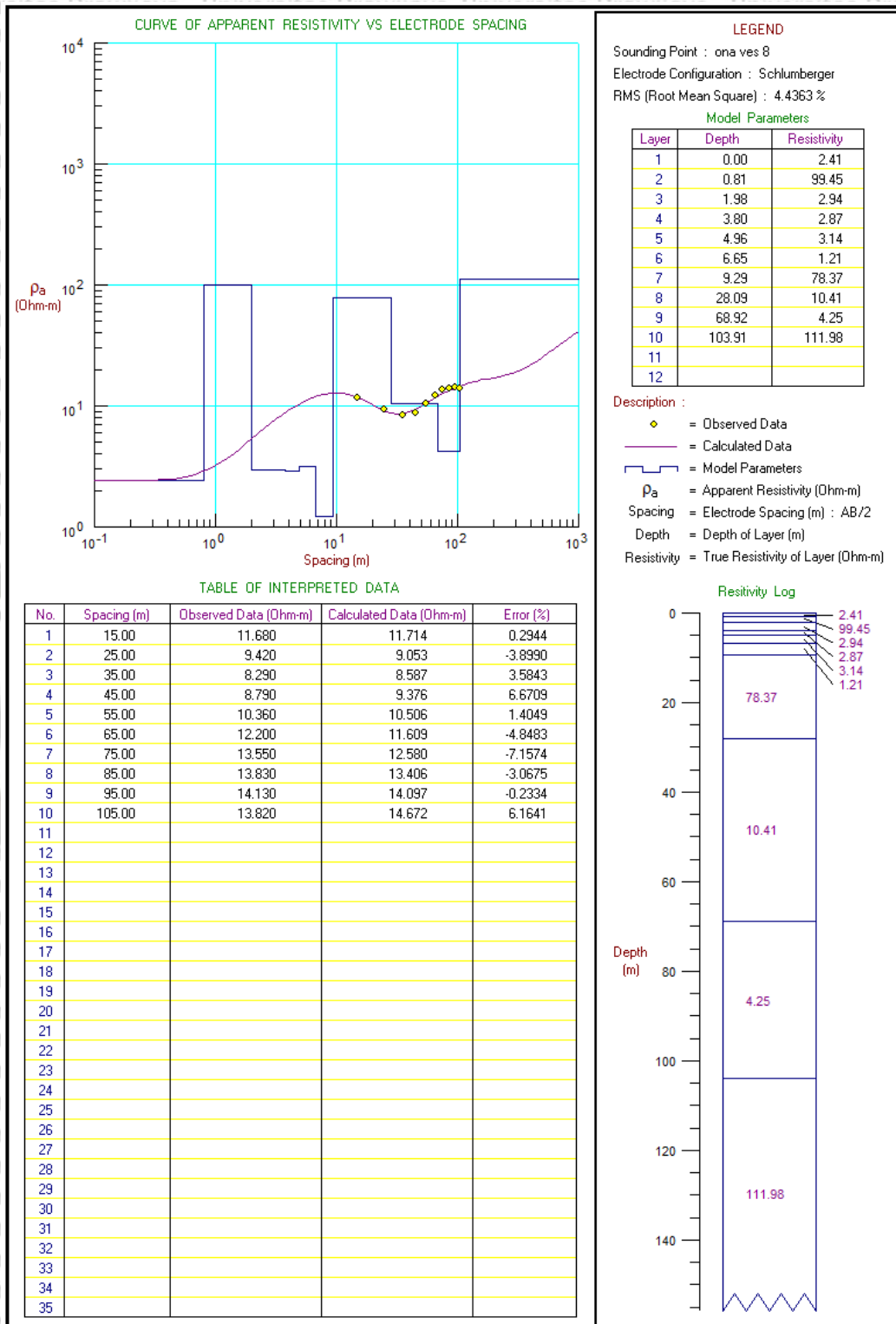
L2. 5 Hasil pengolahan data pada titik VES 5



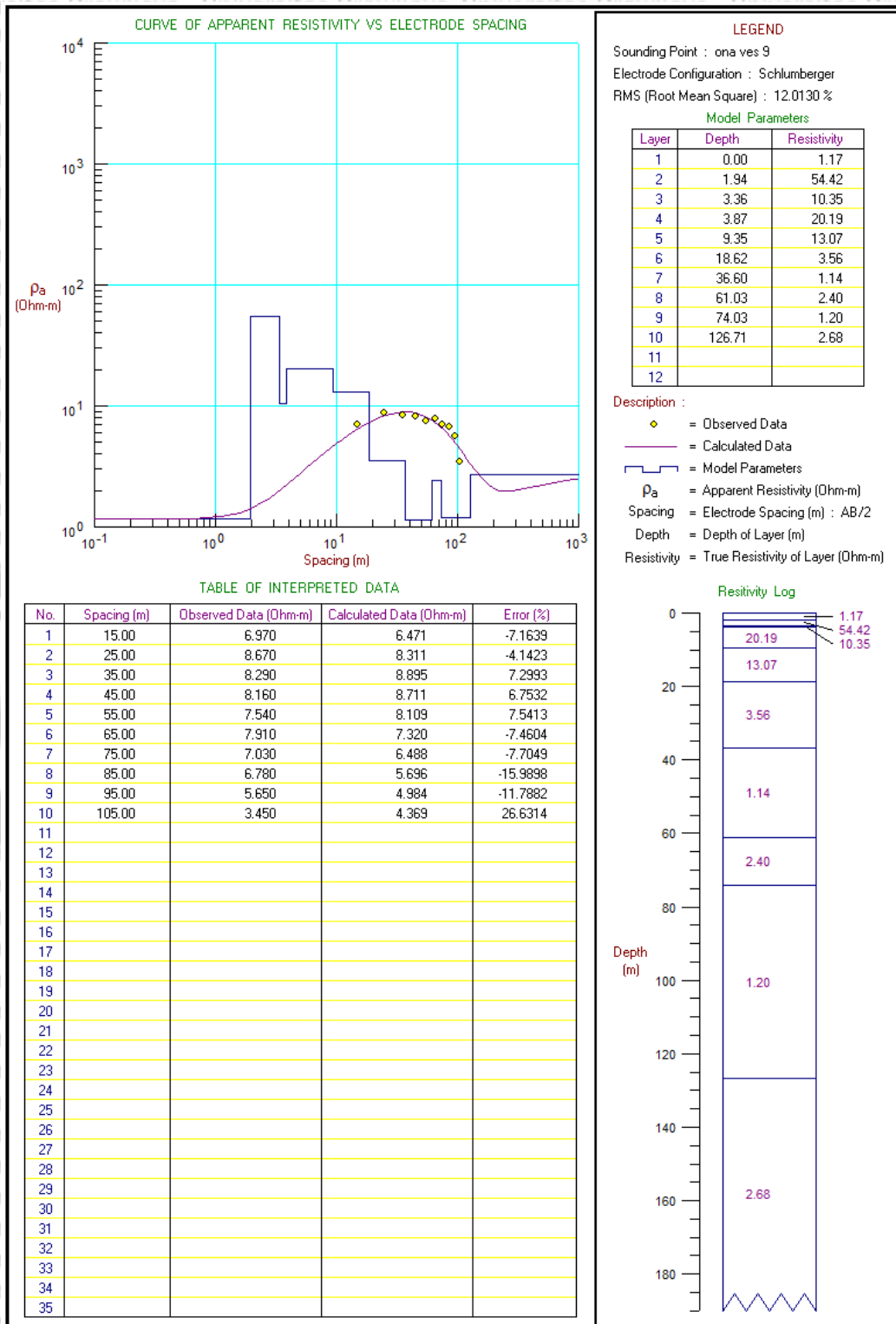
L2. 6 Hasil pengolahan data pada titik VES 6



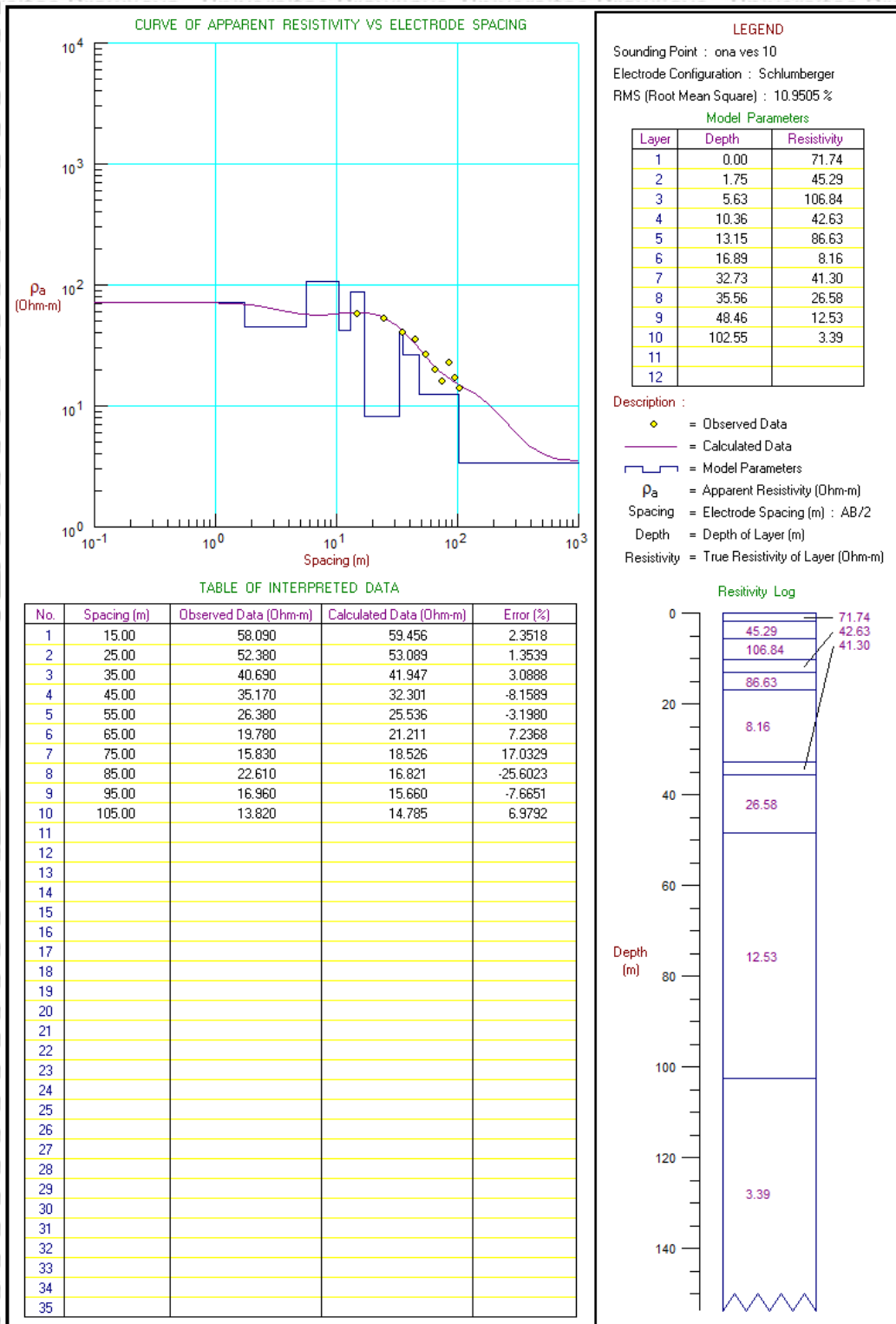
L2. 7 Hasil pengolahan data pada titik VES 7



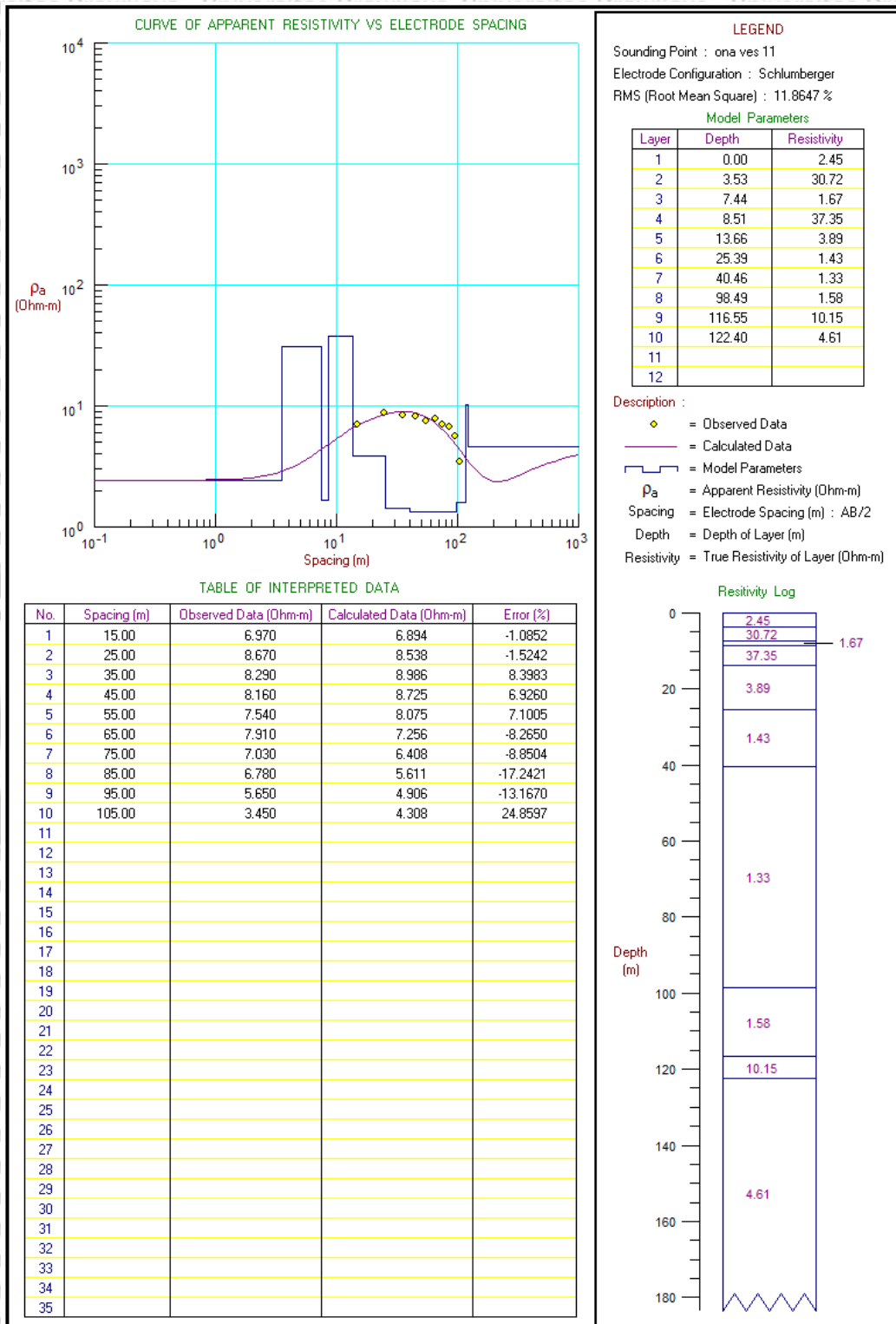
L2. 8 Hasil pengolahan data pada titik VES 8



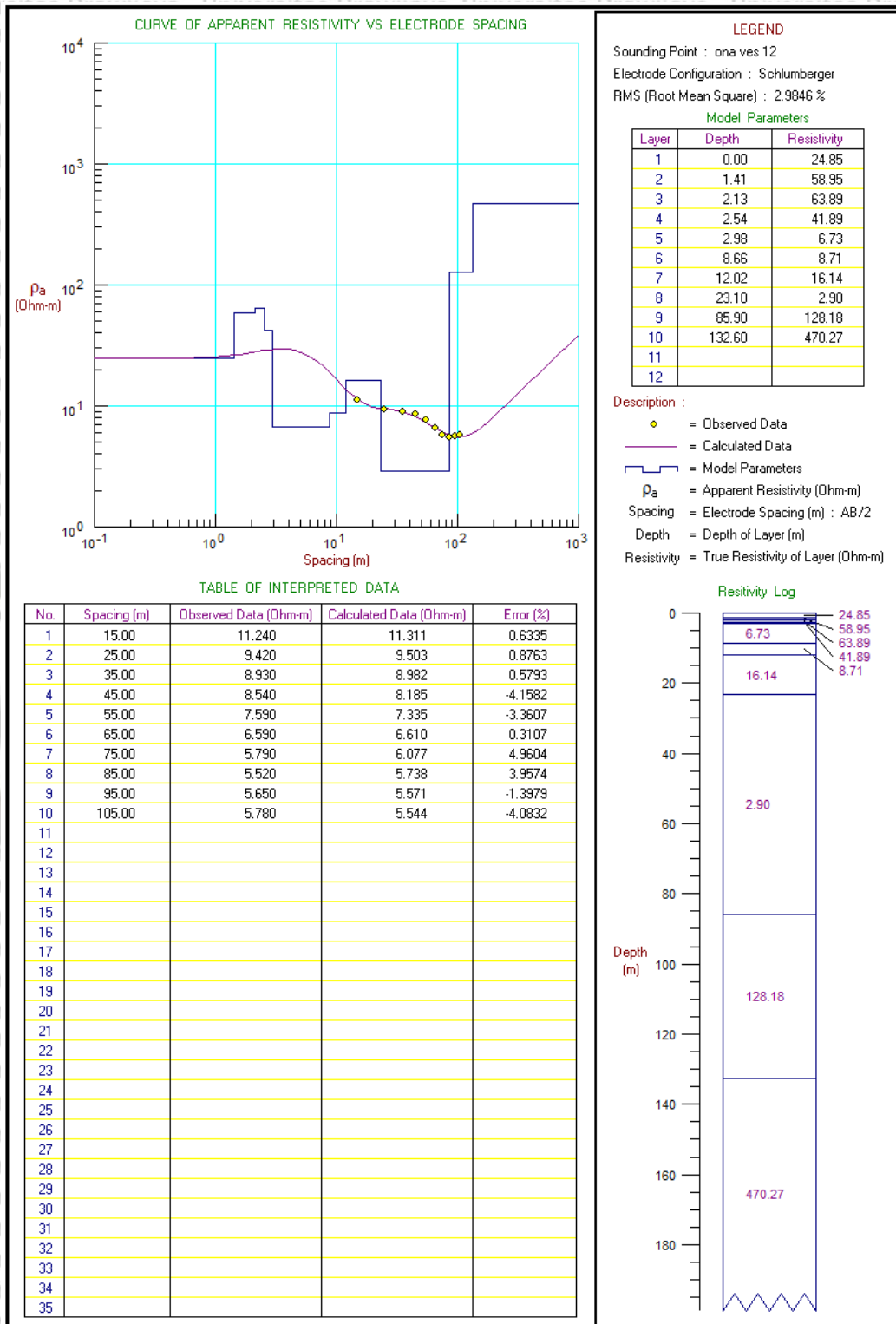
L2. 9 Hasil pengolahan data pada titik VES 9



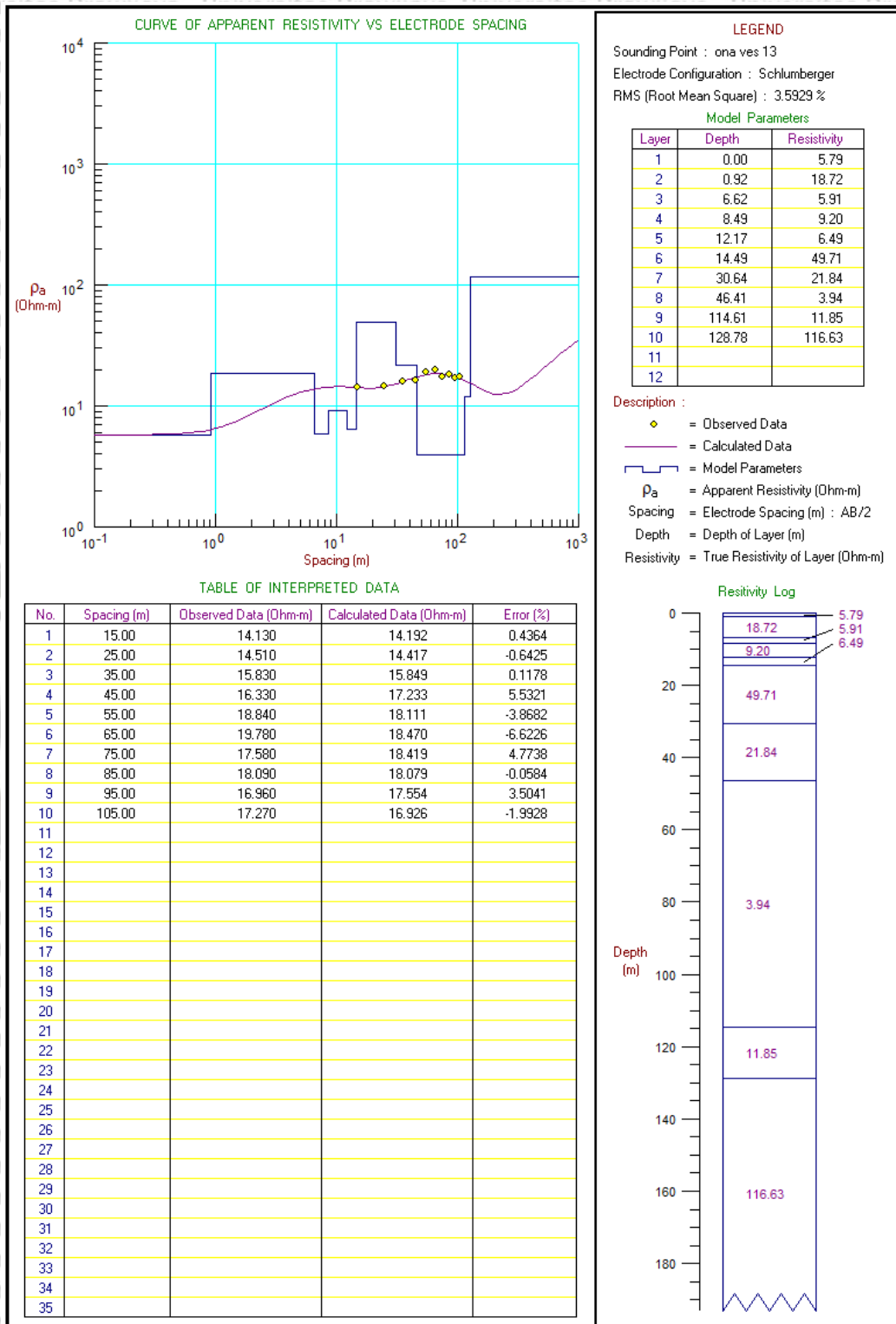
L2: 10 Hasil pengolahan data pada titik VES 10



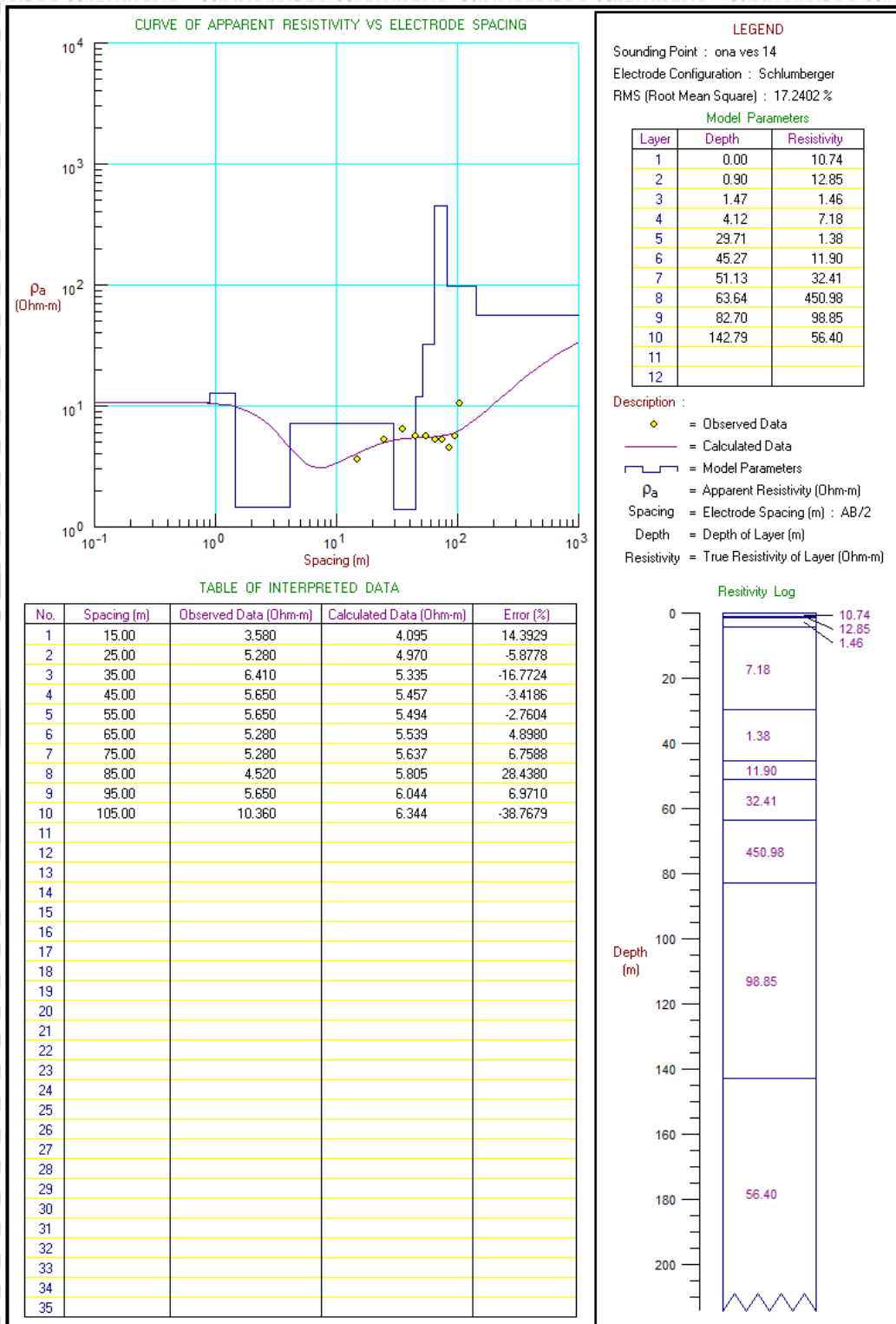
L2. 11 Hasil pengolahan data pada titik VES 11



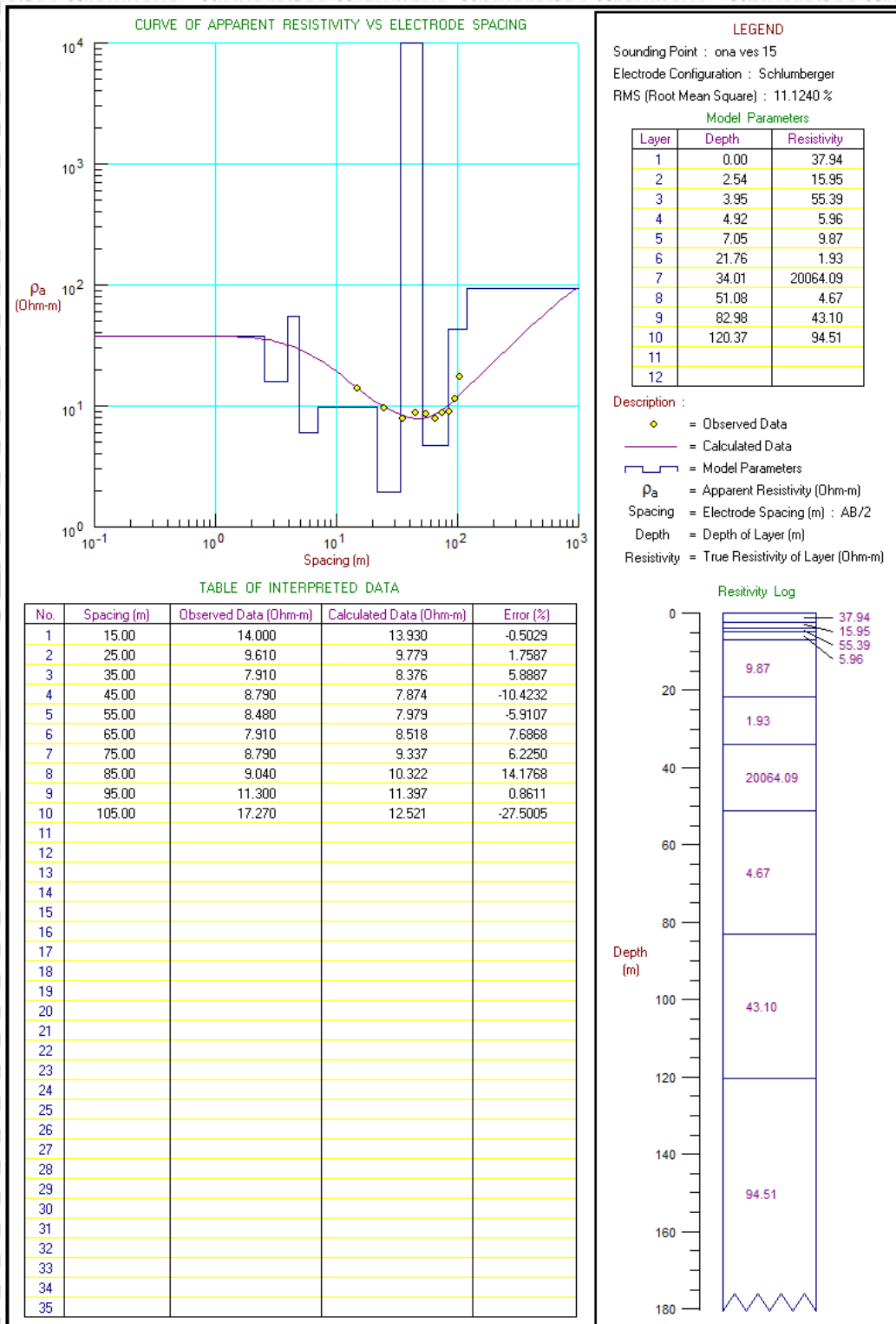
L2: 12 Hasil pengolahan data pada titik VES 12



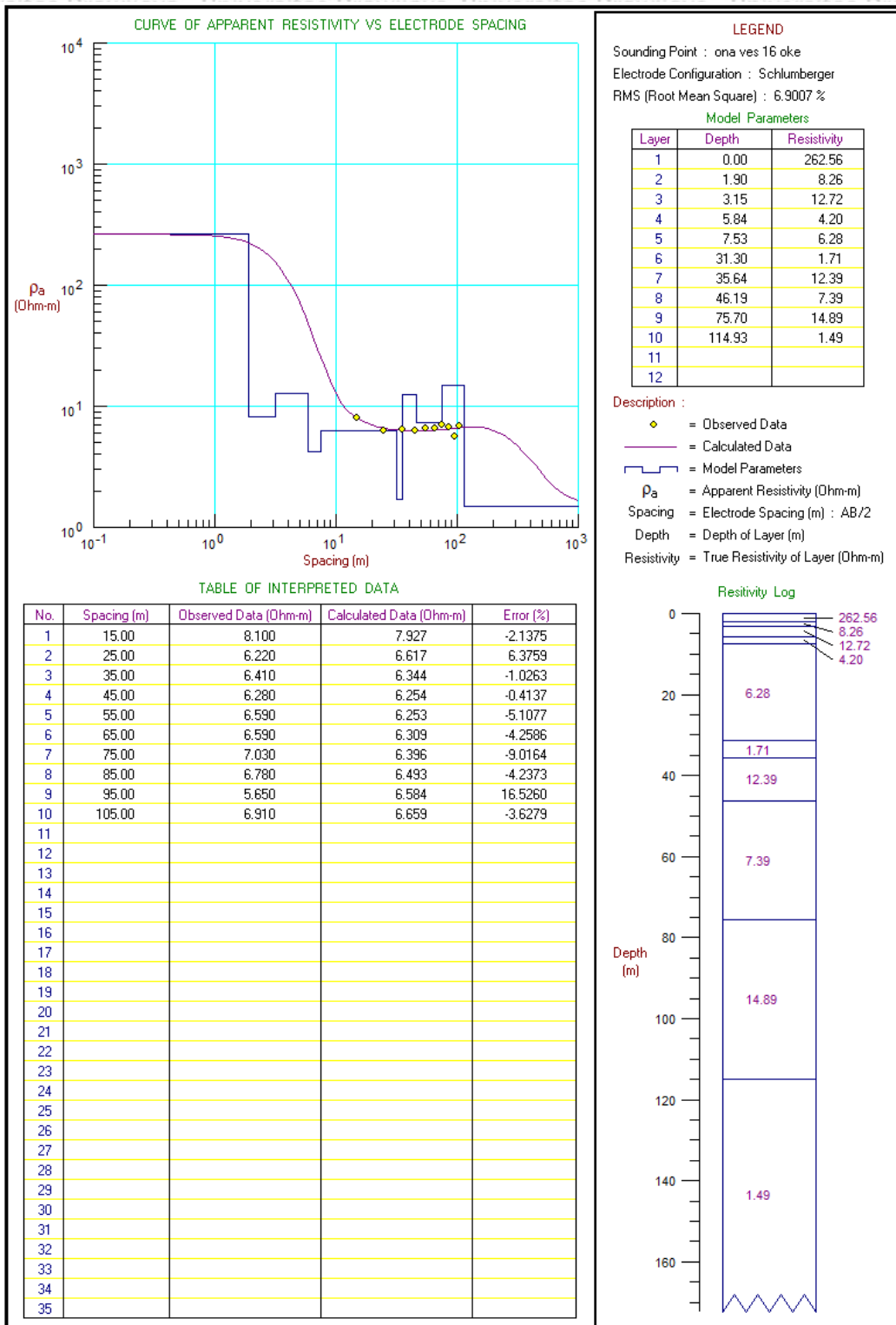
L2. 13 Hasil pengolahan data pada titik VES 13



L2: 14 Hasil pengolahan data pada titik VES 14



L2. 15 Hasil pengolahan data pada titik VES 15



L2: 16 Hasil pengolahan data pada titik VES 16

LAMPIRAN 3

L3. KEDALAMAN LAPISAN CAVITY DENGAN METODE GEORADAR

Zona	Line Profil	Kedalaman Cavity (m)
I	1	0,15-16,88
	2	2,32-12,00
	3	6,06-14,69
	4	0,89-9,06
	5	2,32-11,23
	6	6,25-8,43
II	1	0,29-9,71
	2	1,38-6,71
	3	0,82-8,44
	4	0,11-14,88
III	1	1,29-9,11
	2	4,75-10,50
	3	0,82-4,38
	4	0,21-11,50
	5	0,40-9,05
	6	0,29-7,09
IV	1	6,25-9,43
	2	2,30-14,78
	3	0,07-15,43
	4	0,36-9,71
	5	2,12-5,93
	6	0,29-7,09

L3. Kedalaman lapisan cavity yang diduga merupakan lapisan yang mengandung air panas pada setiap line profil perekaman GPR

LAMPIRAN 4

DOKUMENTASI AKUISISI DATA DI LAPANGAN




L4. 1 Dokumentasi survey awal lokasi daerah gunung Pandan, sebelum melakukan akuisisi data resistivitas dan georadar, dimana akuisisi data yang dilakukan melingkupi manifestasi mataair panas.



L4. 2 Dokumentasi proses akuisisi data resistivitas dan georadar di lapangan





plagiarism-detector
Cutting-edge class tool for plagiarism detection and prevention

19 0675 T

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
PASCASARJANA

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI
Nomor: 1038/UN10.F40/PN/2019
Sertifikat ini diberikan kepada:

Nama : Oriensi Y. K. Teftae
NIM : 176090300111011
Program Studi : Program Magister Ilmu Fisika
Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas : Universitas Brawijaya

Dengan Judul Tesis
Identifikasi Pola Sebaran Air Panas Menggunakan Metode Resistivitas dan Georadar Di Daerah Gunung Pandan Jawa Timur

Telah dideteksi tingkat plagiasinya secara online pada tanggal **20 Mei 2019** dan dinyatakan **bebas plagiasi** dengan kriteria toleransi $\leq 5\%$.

Direktur
Prof. Dr. Marjono, M.Phil
NIP. 195211161988031004

Malang, 20 Mei 2019
Ketua Badan Penerbitan Jurnal
Indah Yanti, S.Si., M.Si.
NIP. 19791129 200501 2 002

L5. Sertifikat Bebas Plagiasi