

SKRIPSI GEOFISIKA

PENGARUH ROTASI TENSOR DATA MAGNETOTELURIK

TERHADAP PEMODELAN TAHANAN JENIS 2D DI DAERAH PANAS

BUMI “RK”



Disusun dan Diajukan Oleh:

RIFNALDO KARANGAN

H061 17 1014

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

HALAMAN JUDUL

**PENGARUH ROTASI TENSOR DATA MAGNETOTELURIK
TERHADAP PEMODELAN TAHANAN JENIS 2D DI DAERAH
PANAS BUMI “RK”**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains

Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

RIFNALDO KARANGAN

H061171014

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

HALAMAN PENGESAHAN

**PENGARUH ROTASI TENSOR DATA MAGNETOTELURIK
TERHADAP PEMODELAN TAHANAN JENIS 2D DI DAERAH PANAS
BUMI "RK"**

Disusun dan diajukan oleh:

RIFNALDO KARANGAN

H061171014

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan
Ilmu Penegtahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 04 Oktober 2021

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama



Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT.Surv.
NIP. 196406161989031006



Dra. Maria, M.Si
NIP. 196307281991032002

Ketua Departemen Geofisika,



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rifnaldo Karangn

NIM : H061171014

Program Studi : Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**“PENGARUH ROTASI TENSOR DATA MAGNETOTELURIK
TERHADAP PEMODELAN TAHANAN JENIS 2D DI DAERAH PANAS
BUMI “RK””**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain. Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 08 Oktober 2021

Menyatakan

RIFNALDO KARANGAN

ABSTRAK

Metode magnetotelurik merupakan salah satu metode geofisika yang mengukur variasi medan elektromagnetik bumi untuk memodelkan tahanan jenis bawah permukaan berdasarkan distribusi nilai tahanan jenis batuan. Metode ini sangat efektif digunakan pada eksplorasi panas bumi dengan keunggulan resolusi konduktivitas lateral dan kedalaman penetrasi lebih dalam untuk penggambaran tahanan jenis dari sistem panas bumi. Keberadaan sistem panas bumi di daerah penelitian ditandai dengan adanya manifestasi panas bumi berupa mata air panas dan kaipohan yang terdapat di bagian utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan hasil pemodelan tahanan jenis 2D dari data yang dirotasi dengan data yang tidak dirotasi. Penelitian dilakukan pada 15 titik pengukuran magnetotelurik dengan mode TE-TM yang terbagi menjadi 2 lintasan dimana L1 terdapat 7 titik dan L2 terdapat 8 titik pengukuran dan dirotasi sebesar 135° dengan analisis data dukung geologi berupa *diagram rosset* yang digunakan dalam pemodelan inversi 1D dan inversi 2D. Berdasarkan hasil pemodelan inversi 2D data magnetotelurik terdapat zona batuan penudung dengan tahanan jenis rendah <20 Ohm-m tersebar disekitar mata air panas yang penyebarannya ke arah utara diperkirakan tersusun dari zona teralterasi hidrotermal yang diindikasikan sebagai satuan aliran piroklastik gunung karua. Lapisan reservoir dengan tahanan jenis sedang berkisar 30-150 Ohm-m diduga tersusun dari batuan pasir dan nilai tahanan jenis pada *heat sources* yaitu diatas 200 Ohm-m diperkirakan berasal dari sisa panas aktivitas vulkanik. Sehingga hasil penampang 2D yang dirotasi memiliki pola sebaran tahanan jenis yang sudah sesuai dengan informasi dari peta geologi, sebagai media fluida untuk menuju ke permukaan sebagai manifestasi panas bumi

Kata Kunci: Rotasi, Magnetotelurik, Panas Bumi, Tahanan Jenis, Gunung Karua.

ABSTRACT

The magnetotelluric method is a geophysical method that measures variations in the earth's electromagnetic field to model subsurface resistivity based on the distribution of rock resistivity values. This method is very effectively used in thermal exploration with the advantages of lateral conductivity resolution and deeper penetration depth for delineating the resistivity of geothermal systems. The existence of a geothermal system in the study area is characterized by the presence of geothermal manifestations in the form of hot springs and kaipohan located in the northern part. This study aims to determine the differences in the results of 2D resistivity modeling from rotated data and unrotated data. The study was conducted at 15 magnetotelluric measurement points with TE-TM mode which is divided into 2 paths where L1 has 7 points and L2 has 8 measurement points and is rotated by 135° with analysis of geological support data in the form of rosette diagrams used in 1D inversion and 2D inversion modeling. Based on the results of 2D inversion modeling of magnetotelluric data, there is a rock cover zone with low resistivity <20 Ohm-m scattered around the hot springs whose distribution to the north is estimated to be composed of a hydrothermal alteration zone indicated as a pyroclastic flow unit of Mount Karua. The reservoir layer with moderate resistivity in the range of 30-150 Ohm-m is thought to be composed of sandstone and the value of resistivity at heat sources, which is above 200 Ohm-m, is thought to come from the residual heat of volcanic activity. So that the results of the 2D rotated cross section have a resistivity distribution pattern that is in accordance with the information from the geological map, as a fluid medium to reach the surface as a geothermal manifestation.

Keywords: Rotation, Magnetotelluric, Geothermal, Resistivity, Mount Karua.

KATA PENGANTAR

Salam Sejahtera Bagi Kita Semua.

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa dengan segala pertolongan dan penyertaannya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan Judul “**Pengaruh Rotasi Tensor Data Magnetotelurik Terhadap Pemodelan Tahanan Jenis 2D Di Daerah Panas Bumi “RK”**”. Pada kesempatan ini izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih kepada Ibu tercinta **Justira Pasodung** yang selalu memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang tulus tiada hentinya untuk penulis dan untuk Almarhum Bapak saya yang ada di sorga . Dalam kesempatan ini pula penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada berbagai pihak atas bantuan, nasihat, didikan dan bimbingan yang diberikan kepada penulis selama ini. Untuk itu dengan senang hati penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak **Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, MT., Surv**, selaku Pembimbing Utama. Terimakasih atas segala waktu, ilmu, nasehat dan segala hal yang diluangkan untuk penulis hingga hingga akhirnya penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Ibu **Dra. Maria, M.Si** selaku Pembimbing Pertama. Terima kasih atas bimbingan dan saran-saran yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini. Salah satu pembimbing yang sangat sayang dan peduli kepada anak bimbingannya, sampai penulis memahami isi skripsi penelitian ini

3. Bapak **Ir. Bambang Harimeji, M.Si** dan Bapak **Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku tim penguji. Terimakasih atas kritik dan saran yang akhirnya membantu lahirnya segala tulisan yang ada dalam skripsi ini.
4. Bapak **Tony Rahadinata** selaku pembimbing lapangan sekaligus pembimbing kantor PSDMBP yang selalu meluangkan waktu ditengah kesibukannya untuk membimbing penulis dengan sangat baik, sehingga ilmu yang diperoleh dalam bidang panas bumi mulai dari akusisi data sampai interpretasi data tersampaikan ke penulis dengan sangat baik, semoga penulis bisa jadi seperti bapak yang ahli dalam bidang panas bumi
5. Seluruh Dosen Departemen Geofisika, Staf Departemen Geofisika, Staf FMIPA UNHAS, Staf Laboratorium, serta Staf Perpustakaan FMIPA UNHAS dan Staf Perpustakaan Umum atas semua ilmu yang telah diajarkan, serta bantuan dan arahan yang bermanfaat bagi penulis.
6. Tim Eksplorasi Geofisika Panas Bumi Bittuang terkhusus **Pak Toni, Pak Awin, Mas Bagus, Mas Angga, Mas Ucup, Mas Yanmak, Mas Upi, Pak Yusuf, Pak Andang, Pak Kumis, Pak Yusuf, Pak Joni dan Pak Budi** yang sudah membantu banyak penulis selama di lapangan. Hatur Nuhun
7. Tim Eksplorasi Geologi dan Geokimia Panas Bumi Bittuang yaitu **Teh Widya, Bu Evelyn, Mas Ivan, Mas Bagus, Mas Adit, Mas Gunawan, Pak Iim, Pak Hery, Pak Pur, Pak Ubay, Kang Adi** yang sudah memberi ilmu baru dan membantu penulis selama di Bittuang. Hatur Nuhun semuanya

8. Sahabat Penulis **Alung S.S** yang selalu setia mendengarkan keluh kesah, mendukung dan menyemangati penulis. Terimakasih dukungan dan motivasinya
9. Kepada **Adhe, Ale, Khusnul**, yang sudah memberi warna selama berkuliah, selalu ada saat penulis sedih maupun senang, selalu mendukung penulis dalam hal apapun, pokoknya terimakasih untuk kalian semuanya. Yok sama-sama melepaskan status mahasiswa ini di Baruga
10. Kepada **Indra Fermanto, S.Si dan Sry Kurnia Rapang, S.Si** yang selalu ada untuk penulis dan sudah sarjana duluan, tetap semangat jalani hidup selanjutnya, kalau ada kerjaan jangan lupa panggil penulis untuk join yah
11. Teman Seperjuangan Tugas Akhir Panas Bumi **Muhammad Nursalam dan Nurainun Sholihat Arifuddin** Terimakasih sudah membantu banyak penulis dalam pengerjaan skripsi.
12. Guru-guru SMA Negeri 1 Palopo, SMP Negeri 7 Palopo dan SD Negeri 84 Salolo yang telah memberikan ilmu kepada penulis sehingga mampu menyelesaikan skripsi ini.
13. Kakak-kakak Geofisika FMIPA UNHAS terkhusus **Kak Wahyuni, S.Si, Kak Akram Ramadhan, S.Si dan Kak Wulan Salle Karurung, S.Si** yang telah banyak membantu dan memberikan saran kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
14. Kepada **Saudara Richard, Rifan, Riyon, Ririn dan Sepupu-Sepupu** Penulis yaitu **Iren dan Ponso** yang selalu menghibur sehingga bisa mengurangi beban Penulis dalam pengerjaan skripsi ini.

15. Kepada keluarga yang ada di Kalimantan, Toraja, Malangke dan di Malaysia yang selalu membantu penulis dalam hal finansial sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik
16. Kepada **Tante Pina, Tante Emi, Tante Sibe, Tante Nata dan Tante Emma** yang selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi
17. Kepada Bapak Tiri, Nenek Nina dan keluarga yang ada di Pattene, Terimakasih atas dukungan dan Financial yang diberikan untuk Penulis
18. Kepada teman-teman dan Tetangga di Lebang terimakasih atas dukungan untuk penulis
19. Teman satu PA dan Kerja Praktik **Dewi Shafira dan Titien Haryani** yang telah berjuang bersama penulis sejak Maba sampai saat ini. Terima kasih atas waktu, saran, motivasi dan bantuannya selama ini.
20. Teman-teman seangkatan **Geofisika 2017 Titien, Illa, Aya, Daya, Unia, Riri, Khusnul, Ale, Faisal, Mirna, Karmila, Hikmah, Ghufa, Nina, Adhe, Nia, Eki, Desha, Wide, Yusrin, Melsi, Miftah, Ainun, Syakirah, Esi, Aul, Sindy, Ajeng, Indra, Ano, Danti, Adi, Uca, Faqih, Fajar, Albar, Tsaqif, Dandung, Dicky, Farid, Jepri, Angga, Zahari dan Khalis, Bintang, Ajeng, Nea, Sindy** terimakasih atas perjuangan dan kerja samanya selama ini, kalian memang yang terbaik.
21. Teman-teman **Himafi 2017** terima kasih atas dukungan, motivasi dan sarannya selama ini.
22. Teman-teman Kepengurusan **BEM FMIPA Unhas 2020/2021** yang sudah memberikan dukungan dan Motivasi kepada penulis.

23. Teman-teman Kepengurusan HMGI 2020/2021 yaitu **Besse, Juni, Siti Asyiqah, Alin, Dicky, Sheren, Rusdin, Muly, Mita, Riska, nafiun dan teman -teman staff** yang sudah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
24. Teman-teman Kepengurusan SPE 2020/2021 yaitu **Khusnul, Ale, Fhaika, Hasnan, Faisal, Dandung, Ekky, Ano, Danti, Farid, Illa, Nia, Adi, Titien, Ainul,, Boncha, Dede, Fira, Fya, Muhe, Ipul, Yeni, Alif, Devi, Fausta, Habib, Haikal, Hesti, Jack, Maulidah, Zakiah, Sarwan, Tsaqif, Sekar, Wilda, Jihan** yang sudah memberikan dukungan kepada penulis.
25. Teman-teman Kepengurusan HAGI 2021/2022 yaitu **Adhe, Ucha, Angga, Sri, Evy, Dhea, Juni, Fiskah, Ananda, Andry, Arsyih, Diky, Fiskah, Haqqul, Huda, Liani, Lovely, Mey, Sindy Tiara** yang sudah memberikan dukungan kepada penulis.
26. Teman-teman Kepengurusan GMKI 2019/2020 yaitu **Kak Oland, Kak Nitus, Kak Dewa, Kak Novi, Kak Deo, Kak Septian, Epi, Nia, Indra, Ocha, Merlin, Dwi, Donny, Zaka, Hana, Ety** yang sudah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
27. Teman-teman Diksar 26 KSR PMI Unhas yaitu **Kiki, Anti, Iqbal, Yuzi, Caka, Grace, Icha, Laras, Uli, Ziah, Egol, Adlun, Ashari, Diva, Ikka, Gresye, Mata, Nisa, Qasas, Sry, Tisba, Yuli, Iin , Hikma** yang sudah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
28. Teman-teman TAMPAN MAKS17 yaitu, **Dicky, Fajar, Faishal, Faqih, Agung, Ardi, Ebit, Fadlan, Puad, Rial, Albar, Ano, Bintang, Reza,**

Riyadi, Qoil, Ale, Dandung, Callu, Aat, Roni, Sabran, Madan Angga, Khalis, Tsaqif, Ucha Zahari yang selalu mendukung dan membantu penulis selama ini.

29. Teman-teman KKN Tematik Gelombang 107 Tamalanrea 17, **Rifdah, Rati, Rifka, Alda, Ratna, Risda, Reni, Remetha, Resa, Ilham, Kiki, Rayna, Richa, Macil, Otniel, Maya, Ikki, Riska, Meylan, Nisa, Kikur, Iqbal, Richard, Ratni, Reza, Radiatul, Rezky dan Pak Akbar** selaku DPK terimakasih atas kerjasama dan pengalaman baru selama ber-KKN. Semangat juga untuk segera menyelesaikan studi
30. Teman-teman Kampus Mengajar, **Naldes, Fitha, Adella, Zaza dan Yustina** yang sudah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
31. Kepada Kanda – kanda angkatan **2013 (MAPERWA), 2014 (Pengurus BEM), 2015 (Pengurus HIMAFI), 2016 (Panitia BK)** yang telah memberikan banyak bantuan dalam menghadapi dunia kampus. SALAM USE YOUR MIND BE THE BEST
32. Kepada adik-adik Pengurus **HMGF dan Himafi 2018** yang sudah membantu penulis dalam hal administrasi mengucapkan banyak terimakasih
33. Kepada adik-adik HMGF 2019 yaitu **Zakiyah, Devi, Afikah, Mey, Akbar, Alif, Ashar, Asyifah, Aisyah, Cindy, Dahlia, Dian, Diky, Fausta, Habib, Haerul, Haikal, Hesti, Ismi, Jack, Jinaan, Tiara, Muji, Mulki, Muli, Nanda, Nur, Haidir, Pipit, Nurul MaulidaH, Sekar, Suleha, William, Yuli, Reika, Sindy Yustin, Nismul, Arsyih, Ikki, Fatihah, Risda, Sarni, Nude, Fadillah, Riman, Indah, Ita, Azizah, Amirul.** SALAM USE YOUR MIND BE THE BEST

34. Kepada adik-adik HMGF 2020 yaitu **Fadia, Ema, Asmawan, Arpah, Awi, Cholis, Milka, Nikoman, Alif, Merlia, Riska, Akbar, Dayat, Rianul, Rezky, Dirham, Alghi, Ihsan, Qalby, Mela, Yonas, Wikal, Ical, Guntur, Resty, Jane, Gloria, Agung, Izzah, Hamman, Echa, Aza, Aurel, Tazkia, Aini, Defina, Ima, Anisa Fitri, Aan, Gery, Shalsa, Asi, Icha, Iis, Fira, Wulan, Lola, Umi, Astri, Ansya, Angel, Imran, Selfi, Emi, Yudi, Miftanisa, Regita, Haslinda, Magfhirah, Faiz, Hasnawiah. SALAM USE YOUR MIND BE THE BEST**

35. Terimakasih kepada **diri sendiri** dan badan ini yang sudah kuat menjalankan kuliah dan dapat menyelesaikan Tugas sebagai mahasiswa dengan baik

36. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi (Kemendikbudristek) yang mendukung penelitian ini dan memberikan pendanaan dalam program Talenta Inovasi Indonesia sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian ini dengan baik.

37. Serta semua pihak yang telah membantu selama penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak sempat penulis sebutkan satu-persatu.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca maupun penulis. Penulis telah mengerahkan segala kemampuan dalam proses penyusunan skripsi ini hingga selesai.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Ruang Lingkup	3
I.4 Tujuan Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
II.1 Geologi Regional	4
II.1.1 Geomorfologi.....	4
II.1.2 Struktur Geologi.....	5
II.1.3 Stratigrafi	5
II.1.4 Kelurusan	7
II.2 Sistem Panas Bumi	10
II.2.1 Panas Bumi	12
II.2.2 Perpindahan Panas	12

II.3 Magnetotelurik.....	14
II.4 Asumsi dalam Magnetotelurik.....	15
II.5 Sumber Sinyal Magnetotelurik	15
II.6 Konsep dasar Magnetotelurik	16
II.6.1 Persamaan Maxwell pada metode magnetotelurik	17
II.7 Impedansi bumi.....	19
II.8 Penetrasi Kedalaman (<i>skin depth</i>).....	20
II.9 Analisis Tensor	21
II.10 Rotasi	21
II.11 Tahanan Jenis.....	22
II.12 Pemodelan 2 Dimensi Mode TE dan TM	23
II.13 Hasil penelitian sebelumnya	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
III.1 Lokasi Penelitian	27
III.2 Data Penelitian.....	27
III.3 Software yang digunakan	28
III.4 Alat dan Bahan	28
III.5 Prosedur Pengambilan Data.....	29
III.6 Pengolahan Data	32
III.6.1 Input Data.....	32
III.6.2 <i>Software Phoenix Geophysics SSMT2000</i>	32
III.6.3 Editing Parameter Lapangan	33
III.6.4 Transformasi Data	34
III.6.5 <i>Processing Setup</i>	34
III.6.6 Make PFT	35

III.6.7 <i>Software Phoenix Geophysics</i> MTEditor	36
III.7 Pengolahan Data Menggunakan WinGLink.....	37
III.7.1 Rotasi.....	37
III.7.2 Pembuatan Profil Lintasan	41
III.7.3 Pemodelan Inversi 2D	42
III.8 Interpretasi Data.....	43
III.9 Bagan Alir Penelitian.....	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
IV.1 Hasil.....	45
IV.1.1 Lintasan Pengukuran.....	45
IV.2 Hasil Perbandingan Inversi 1D.....	45
IV.3 Hasil Perbandingan Inversi 2D.....	48
IV.4 Hasil Perbandingan statik shift.....	52
IV.5 Interpretasi.....	53
IV.3 Pembahasan	57
BAB V PENUTUP	59
V.1 Kesimpulan	59
V.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Peta geologi daerah penelitian	4
Gambar II.2 Peta kelurusan daerah penelitian	8
Gambar II.3 Peta anomali magnet total daerah panas bumi “RK”	9
Gambar II.4 Peta anomali sisa daerah panas bumi “RK”	10
Gambar II.5 Skema sumber panas bumi	11
Gambar II.6 Perpindahan panas secara konduksi dan konveksi	14
Gambar II.7 Konsep gelombang elektromagnetik di bawah permukaan.....	16
Gambar II.8 Model sederhana 2D	23
Gambar II.9 Hasil penampang tahanan jenis 2D	25
Gambar III.1 Peta lokasi penelitian	27
Gambar III.2 Data lapangan (kiri) dan data kalibrasi (kanan).....	32
Gambar III.3 Tampilan awal <i>Software Phoenix Geophysics SSMT2000</i>	33
Gambar III.4 Editing parameter lapangan	33
Gambar III.5 Transformasi data.....	34
Gambar III.6 Edit parameter menggunakan edit PRM	34
Gambar III.7 <i>Make PFT</i>	35
Gambar III.8 Output data.....	36
Gambar III.9 Kurva tahanan jenis semu dan fasa pada titik 87 sebelum editing (atas) dan setelah editing (bawah).....	37
Gambar III.10 <i>Field set up</i> magnetotelurik dan kerangka rotasi	38
Gambar III.11 Rotasi	41
Gambar III.12 Tampilan profil lintasan.....	41
Gambar III.13 Parameter inversi.....	42
Gambar III.14 Tabel tahanan jenis batuan.....	43

Gambar IV.1 Peta lintasan.....	45
Gambar IV.2 Perbandingan inversi 1D yang tidak dirotasi dan dirotasi.....	46
Gambar IV.3 Perbandingan 1D Tidak rotasi dan rortasi.....	48
Gambar IV.4 Hasil pemodelan 2D data magnetotelurik	49
Gambar IV.5 Peta nilai tahanan jenis per-kedalaman	51
Gambar IV.6 Perbandingan statik shift pada titik 89 L1.....	52
Gambar IV.7 Perbandingan statik shift pada titik 71 L2.....	52
Gambar IV.8 Hasil interpretasi L1	54
Gambar IV.9 Hasil interpretasi L2.....	56

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1	HASIL SMOOTHING
LAMPIRAN 2	HASIL INVERSI 1D
LAMPIRAN 3	KOREKSI STATIK SHIFT
LAMPIRAN 4	TRANSFORMASI FOURIER
LAMPIRAN 5	PERSAMAAN MAXWELL

DAFTAR SIMBOL

ϵ_0	: Permittivitas listrik ruang hampa (Farad/m) ($8,85 \times 10^{-12}$)
μ_0	: Permeabilitas magnetik ruang hampa (Henry/m) ($4\pi \times 10^{-7}$)
∇	: Operator del, vektor dari turunan parsial ($d / dx_1, \dots, d / dx_n$).
σ	: Konduktivitas (Siemens/m)
δ	: Kedalaman penetrasi (m)
k	: Bilangan gelombang
ρ	: Resistivitas (ohm.m)
θ	: Sudut Fase (degres)
ρ_a	: Resistivitas semu (ohm.m)
\mathbf{E}	: Medan Listrik (Volt/m)
\mathbf{B}	: Fluks atau induksi magnetik (Weber/m ² atau Tesla)
\mathbf{j}	: Rapat arus (Ampere/m ²)
Ψ	: Fungsi Objektif
λ	: Parameter Regulasi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi yang juga di kenal dengan energi *geothermal* merupakan energi panas alami yang dihasilkan dan disimpan di dalam bumi. Proses terbentuknya energi ini tidak lepas dari adanya magma yang mempengaruhi air di dalam permukaan bumi, sehingga menghasilkan air dan uap panas bertekanan tinggi yang terbentuk di dalam kerak bumi dan ditransfer ke permukaan secara konduksi dan konveksi, kemudian mengalir ke permukaan melalui rekahan – rekahan yang diakibatkan oleh struktur geologi sehingga membentuk manifestasi panas bumi (PSDMBP,2020).

Secara umum energi ini relatif lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil karena menghasilkan gas rumah kaca yang sedikit dan relatif lebih murah untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Energi panas bumi menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang diyakini melimpah dan ramah lingkungan. Indonesia bahkan memiliki kekayaan panas bumi yang sangat besar, hal ini disebabkan karena Indonesia memiliki jalur gunungapi (Ring of Fire) yang dihasilkan akibat tumbukan 3 lempeng yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik. Potensi energi panas bumi yang dimiliki oleh Indonesia mencapai sekitar 27.140 MW yang tersebar di 253 lokasi di seluruh Indonesia. Namun penggunaan energi panas bumi sebagai pembangkit tenaga listrik hanya sekitar 4% dan pemanfaatan energi panas bumi secara langsung masih belum optimal (Daud, 2010)

Untuk memaksimalkan potensi energi panas bumi diperlukan disiplin ilmu geofisika dalam tahapan eksplorasi panas bumi yang bertujuan untuk memetakan kondisi bawah permukaan. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan yaitu metode magnetotelurik dengan keunggulan resolusi konduktivitas lateral dan kedalaman penetrasi lebih dalam yang bergantung pada besar frekuensi dan periode serta ideal untuk penggambaran tahanan jenis dari sistem panas bumi.

Dalam metode magnetotelurik, parameter terukur adalah signal medan Elektromagnetik (EM) alami, yaitu medan magnet bumi (H_x, H_y, H_z) dan medan listrik bumi (E_x, E_y). Adapun parameter yang dianalisis adalah tahanan jenis semu, impedansi dan fasa. Pada saat proses pengukuran magnetotelurik di lapangan umumnya data magnetotelurik mengalami distorsi yang disebabkan oleh tiga faktor yaitu: (1) perbedaan sistem koordinat pengukuran dengan arah strike, (2) variasi topografi dan heterogenitas di dekat permukaan yang menyebabkan efek statik dan (3) struktur lokal 3D yang menutupi struktur utama (regional) (Asep, 2014). Pada penelitian ini akan dijelaskan pentingnya analisis dan pemahaman mengenai rotasi tensor data magnetotelurik untuk mendapatkan model tahanan jenis 2D di sistem panas bumi. Penentuan arah (sudut rotasi) didapatkan berdasarkan analisis metode kuantitatif yaitu dengan data dukung geologi berupa *diagram rosset*. Pada penelitian sebelumnya oleh Zarkasyi (2019) di daerah penelitian dilakukan interpretasi struktur panas bumi dengan mendefinisikan sistem panas bumi dengan hasil pemodelan tahanan jenis 2D, namun tidak melakukan pemodelan tahanan jenis 2D dengan rotasi tensor. Oleh karena itu penelitian ini akan melihat pengaruh

rotasi tensor data magnetotelurik terhadap pemodelan tahanan jenis 2D di daerah panas bumi “RK”.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hasil pemodelan tahanan jenis bawah permukaan pada data magnetotelurik yang dirotasi?
2. Bagaimana perbedaan hasil pemodelan tahanan jenis yang dirotasi dengan pemodelan tahanan jenis yang tidak dirotasi?
3. Bagaimana interpretasi sistem panas bumi berdasarkan hasil pemodelan 2D?

1.3 Ruang Lingkup

Penelitian ini melakukan pemodelan tahanan jenis 2D data magnetotelurik di daerah panas bumi “RK” meliputi : *Pre-processing* data, *editing* data, pemodelan data, pengolahan data yang diolah menggunakan *Software* SSMT.2000, MT Editor, dan WinGlink

1.4 Tujuan Penelitian

1. Membuat hasil pemodelan tahanan jenis bawah permukaan pada data magnetotelurik yang dirotasi
2. Mengetahui perbedaan hasil pemodelan tahanan jenis yang dirotasi dengan pemodelan tahanan jenis yang tidak dirotasi
3. Menginterpretasi sistem panas bumi berdasarkan hasil pemodelan 2D

ke arah utara, pada bagian puncak dan tubuh membentuk suatu kaldera. Batuannya dibentuk oleh batuan vulkanik hasil kegiatan gunungapi itu sendiri yaitu Gunungapi Karua. Secara keseluruhan, batuan tertua berumur Kapur yang berupa batuan malihan. Sedangkan batuan termuda berupa batuan vulkanik yang terdiri dari aliran lava dan aliran piroklastik merupakan produk Gunungapi Karua yang berumur Plistosen (Soetoyo, 2009)

II.1.2 Struktur Geologi

Struktur geologi di daerah panas bumi “RK” ini sangat dipengaruhi oleh tiga sesar regional yang mengelilingi daerah penelitian (Jaya dan Nishikawa, 2013):

- a. Sesar Palu-Koro merupakan sesar yang memiliki arah utara-selatan hingga barat laut-tenggara
- b. Sesar Walanae merupakan sesar memiliki arah barat laut-tenggara
- c. Sesar Masapu memiliki orientasi barat laut – tenggara

Pergerakan dari sesar-sesar tersebut memungkinkan adanya struktur sekunder seperti sesar dan lipatan di sekitar penelitian

II.1.3 Stratigrafi

Stratigrafi daerah panas bumi “RK” secara garis besar dikelompokkan menjadi 2 kelompok yaitu Satuan batuan Non Gunungapi Karua dan Satuan batuan Gunungapi Karua (Soetoyo, 2010):

1. Satuan batuan Non Gunungapi Karua

- **Satuan batuan malihan (Kbm)** merupakan satuan paling tua, terdiri dari batusabak dan filit yang merupakan batuan malihan

derajat lemah-sedang termasuk dalam Formasi Latimojong yang berumur kapur (Ratman dan Atmawinata, 1993)

- **Satuan batupasir (Tps)** terdiri dari dominan batupasir, batulempung, breksi dan tuf. Kesebandingan dengan geologi regional, satuan ini merupakan bagian dari Formasi Sekala yang berumur Miosen.
- **Satuan lava Gunung Panusuk (TPI)** merupakan lava dengan komposisi andesit dan merupakan batuan vulkanik dari Formasi Talaya yang berumur Miosen.
- **Satuan lava Gunung Rupp (TRI)** berupa lava dengan komposisi basalt. Kesebandingan dengan geologi regional, batuan ini berupa batuan vulkanik dari Formasi Walimbong yang berumur Miosen.
- **Satuan intrusi Rattebombong (TRbi)** terdiri dari batuan terobosan berjenis granit dan Menurut hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Pliosen

2. Satuan Batuan Gunungapi Karua

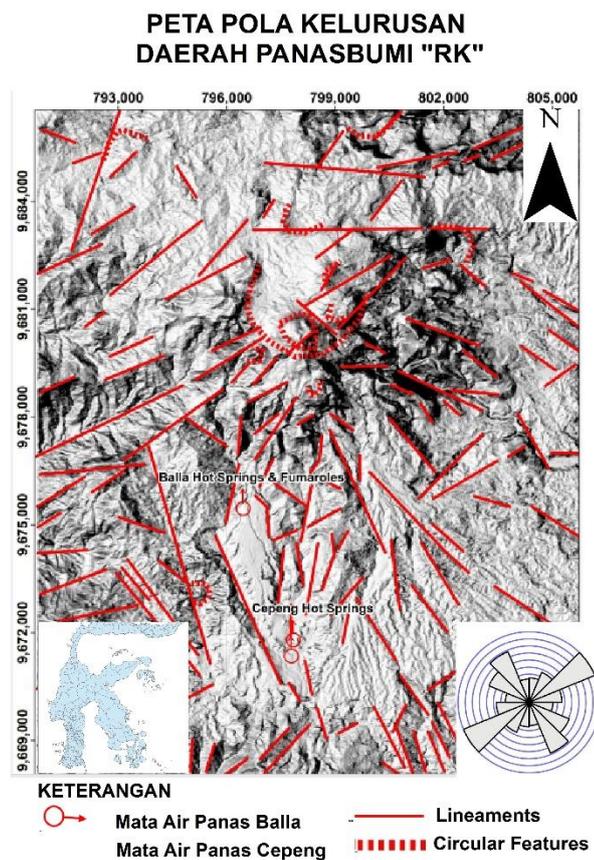
- **Satuan lava Gunungapi Karua-1 (QKI-1)** satuan ini terdiri dari lava dengan komposisi andesit. Secara megaskopis, andesit berwarna abu-abu sampai abu-abu kehijauan. Satuan ini merupakan lava tertua Gunungapi Karua diperkirakan berumur Plistosen (Soetoyo,2010)

- **Satuan lava Gunungapi Karua-2 (QKI-2)** berupa lava dengan komposisi dasitik. Hubungan relatif dengan satuan batuan lainnya, satuan ini diperkirakan berumur Plistosen.
- **Satuan Aliran piroklastik Gunungapi Karua (QKap)** berupa klastika gunungapi terdiri dari litik dan fitrik (pumice) berukuran abu (ash) sampai dengan bom, berkomposisi riolit-dasitik, setempat dijumpai endapan lahar. Satuan ini merupakan produk letusan besar Gunungapi Karua yang terjadi pada Kala Pleistosen.
- **Satuan Jatuhan piroklastik Gunungapi Karua (QKjp)** berupa klastika gunungapi berukuran debu (ash) sampai dengan lapili, berkomposisi riolit-dasitik, terdapat fragmen batuapung (pumice), sticky diperkirakan berumur Plistosen.
- **Satuan lava Gunung Malibu (QMI)** merupakan kubah lava sebagai parasit dari Gunungapi Karua, diperkirakan berumur Plistosen.

II.1.4 Kelurusan

Berdasarkan hasil penyelidikan di daerah panas bumi dengan analisis peta DEM (digital elevation mode), terdapat gejala-gejala struktur di permukaan seperti pemunculan mata air panas dan kelurusan (Soetoyo, 2009). Secara umum, daerah penelitian terdapat suatu pola *circular features* berbentuk tapal kuda membuka ke arah utara di Gunung Karua. Selain itu, analisis pola kelurusan yang terbentuk pada peta didominasi oleh kelurusan berarah barat laut – tenggara dan timur laut –

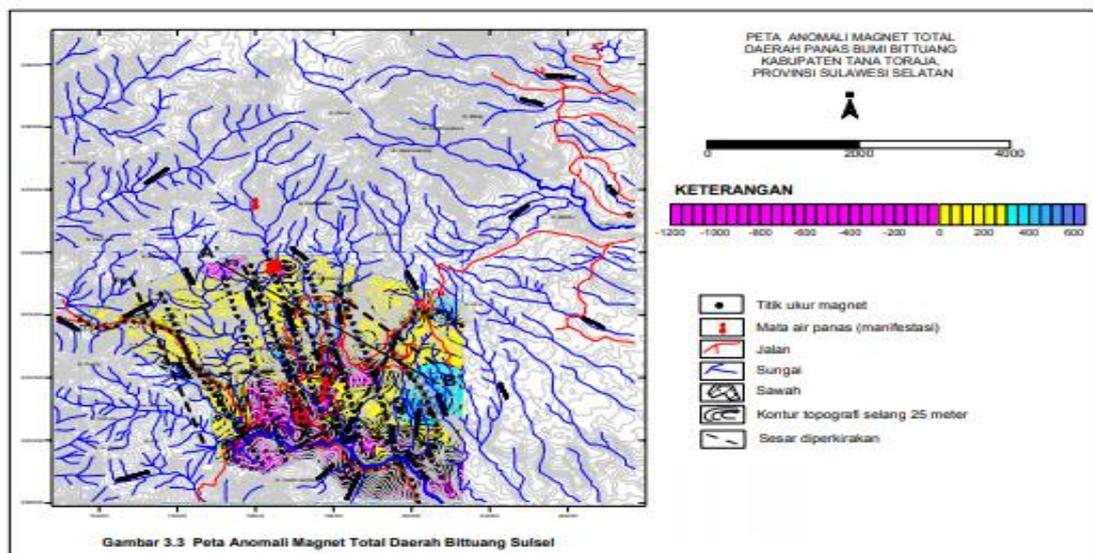
barat daya. Sehingga terdapat dua pola kelurusan yang kemungkinan memiliki implikasi pada sejarah geologi (tektonisme dan volkanisme) dan kumpulan kelurusan tersebut juga mengontrol adanya kehadiran manifestasi panas bumi di daerah penelitian



Gambar II.2 Peta Kelurusan daerah penelitian (PSDMBP,2020)

Berdasarkan metode geomagnet dalam eksplorasi panas bumi oleh Idral, 2009. Hasil penelitiannya berupa kerentanan magnet batuan, penampang anomali magnet dan peta anomali sisa magnet total. Pengukuran suseptibilitas (kerentanan, K) magnetik batuan pada 10 contoh batuan yang representatif, berkisar antara 0.01 sampai 0.79×10^{-3} cgs. Nilai terendah terdapat pada batuan tufa dasitik, sedangkan

nilai tertinggi terdapat pada komponen batuan tufa breksi (andesit) dengan nilai $0.56 - 0.79 \times 10^{-3}$ cgs. Secara umum penampang anomaly geomagnet lintasan A sampai G (**Gambar II. 3**) memperlihatkan rentang anomaly positif di daerah ini berkisar antara 3 s/d 460 nT, sedangkan rentang anomaly negatif bervariasi antara -1 s/d -1044 nT. Kontras anomaly positif dan negatif yang terjadi pada beberapa titik amat di daerah ini berkisar antara $> 300 - >1300$ nT, Hal ini mengindikasikan di sekitar titik amat tersebut terdapat struktur geologi seperti kontak geologi ataupun sesar.

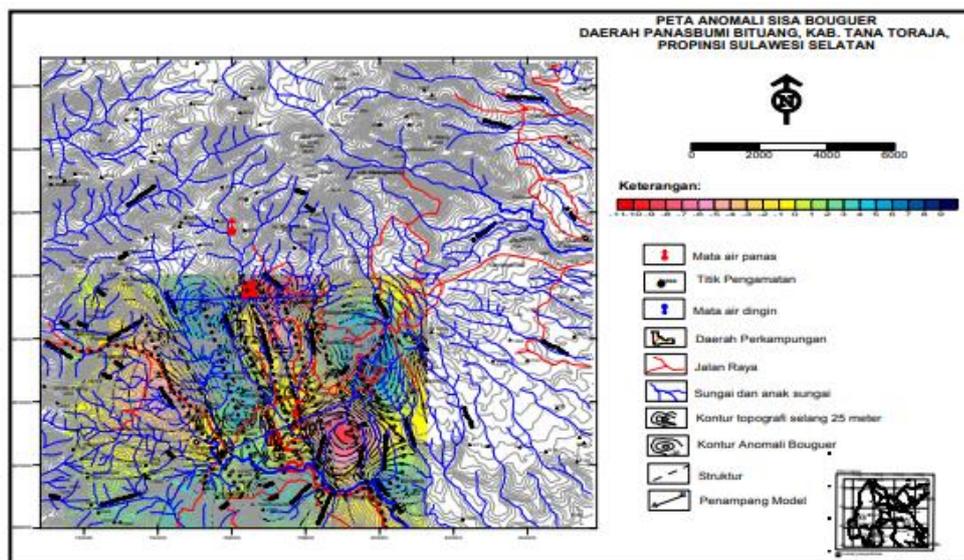


Gambar II.3 Peta Anomali Magnet Total Daerah Panas bumi RK
(Idral,2009)

Berdasarkan metode gaya berat, dilakukan analisis densitas batuan dan pengamatan terhadap sebaran anomaly Bouguer (regional dan residual), pemodelan gaya berat 2D, serta analisis struktur gaya berat oleh Kusuma, 2009. Hasil analisa yang didapat terlihat bahwa densitas tertinggi terdapat pada batuan basalt dengan nilai $2,99 \text{ gr/cm}^3$, nilai densitas yang diperlihatkan berkisar antara $2,34 - 2,99 \text{ gr/cm}^3$. Hasil

densitas tersebut di atas digunakan untuk melakukan interpretasi gaya berat secara kualitatif dan kuantitatif serta diperlukan sebagai pembandingan terhadap hasil.

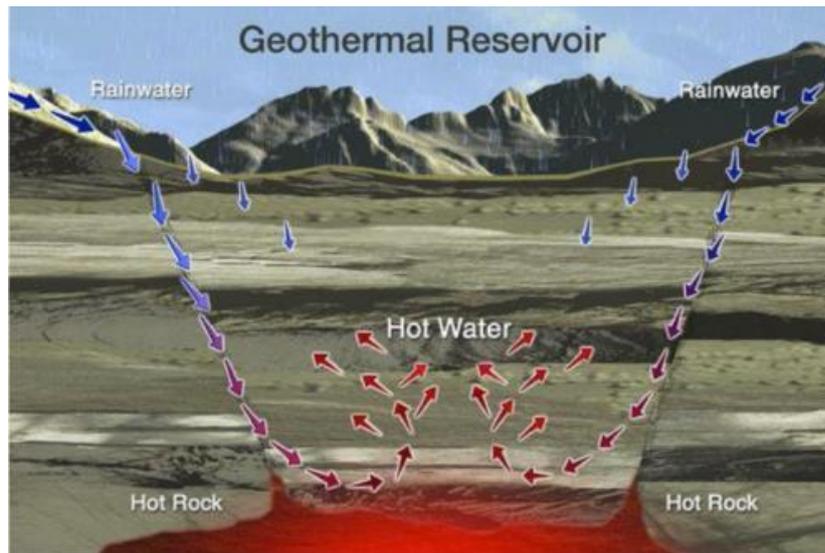
Peta anomali Bouguer yang diperlihatkan berkisar antara (20 -30) mgal, dimana pola anomalnya memiliki suatu rentang anomali Bouguer dan gradien anomali yang relatif besar. Berdasarkan dari peta anomali Sisa (**Gambar II.4**) memperlihatkan kelurusan-kelurusan gaya berat berarah baratdaya-timurlaut, dan baratlaut - tenggara yang secara tegas terlihat di bagian tengah, utara dan timur daerah penyelidikan sangat bertepatan dengan keberadaan struktur-struktur geologi yang dapat dikenali di permukaan dan dari kelurusan kontur topografi.



Gambar II.4 Peta Anomali Sisa Daerah Panas bumi RK (Kusuma,2009)

II.2 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi adalah sumber energi seperti air panas, uap panas, serta gas-gas lain yang terdapat di dalam perut bumi sebagai perpindahan panas secara alami dalam volume tertentu di kerak bumi dimana panas dipindahkan dari sumber panas ke zona pelepasan panas (Hochstein dan Browne, 2000)



Gambar II.5 Skema sumber panas bumi (Daud,2009)

Komponen utama pembentuk suatu sistem panas bumi (Dwikorianto, 2006) adalah:

1. Sumber panas (Heat Sources)

Sumber panas dapat berupa intrusi batuan, dapur magma (magma chambers), atau gradien temperatur (semakin dalam, temperatur semakin meningkat). Sumber panas mengalirkan panas melalui tiga proses yaitu konduksi, konveksi dan radiasi (Gupta dan Roy, 2007).

2. Batuan Reservoir

Batuan Reservoir merupakan struktur batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik, berperan untuk menyimpan fluida sehingga fluida dapat terakumulasi dan dipanaskan oleh *heat source*.

3. Batuan Penutup (Cap Rock)

Lapisan penutup pada sistem panas bumi biasanya berupa batuan dengan permeabilitas rendah untuk mencegah jalan keluar akumulasi fluida panas

dalam reservoir, atau struktur penutup (Cumming dan Mackie, 2000). Di atas batuan penutup biasanya akan terjadi proses alterasi karena adanya interaksi fluida sehingga menimbulkan manifestasi di atas permukaan berupa air panas ataupun uap panas.

4. Fluida panas bumi

Fluida panas bumi berasal dari air permukaan (*air meteoric*) yang masuk ke bawah permukaan melalui rekahan maupun ruang antar butiran batuan membentuk sistem kantong fluida atau reservoir. Fluida ini menjadi media dalam proses transfer panas dari *heat source* ke penampang geothermal secara konduksi

Berdasarkan temperatur reservoirnya, (Hochstein dan Browne, 2000) mengklasifikasikan sistem panas bumi menjadi:

- a. Sistem bersuhu tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$)
- b. Sistem bersuhu sedang ($125^{\circ}\text{C}-225^{\circ}\text{C}$)
- c. Sistem bersuhu rendah ($<125^{\circ}\text{C}$)

II.2.1 Panas Bumi

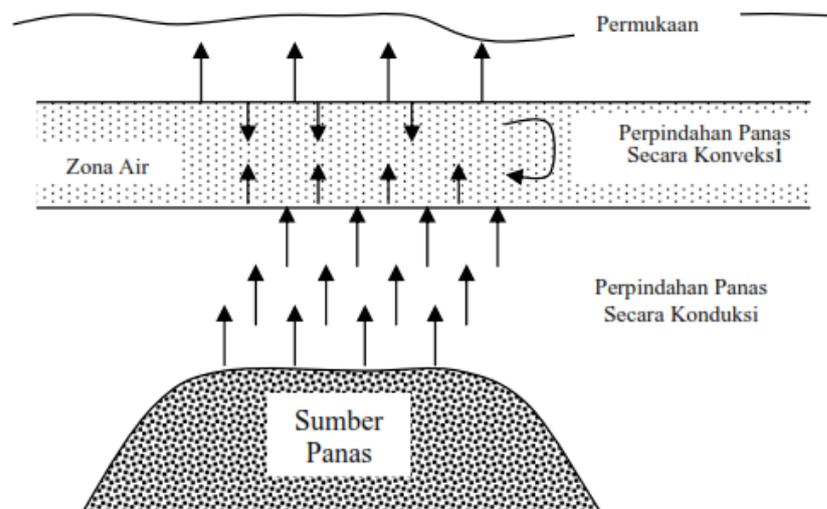
Menurut bahasa Yunani, *geothermal* terdiri dari 2 kata, yaitu *geo* dan *thermal*. *Geo* adalah bumi sedangkan *thermal* adalah panas, jadi jika digabungkan berarti panas bumi. Secara istilah, *geothermal* dapat diartikan sebagai energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya yang dapat ditemukan di kawasan jalur vulkanik. Tapi tidak semua sumber panas dapat kita katakan sebagai *geothermal*. Setidaknya ada 6

syarat sumber panas bisa dikategorikan kedalam energi *geothermal*, diantaranya (Suhartono,2012) :

- 1) Adanya batuan panas bumi berupa magma.
- 2) Adanya persediaan air tanah secukupnya yang sirkulasinya dekat dengan sumber magma agar dapat terbentuk uap air panas.
- 3) Adanya batuan reservoir yang mampu menyimpan uap dan air panas.
- 4) Adanya batuan keras yang menahan hilangnya uap dan air panas.
- 5) Adanya gejala-gejala tektonik, dimana dapat terbentuk rekahan-rekahan di kulit bumi yang memberikan jalan kepada uap dan air panas bergerak ke permukaan bumi.
- 6) Panasnya harus mencapai suhu tertentu minimum sekitar $180^{\circ} - 250^{\circ} C$.

II.2.2 Perpindahan Panas

Pada sistem panas bumi terdapat material panas yang berasal dari *heat sources* di bawah permukaan bumi yang menyebabkan terjadinya aliran panas hingga ke permukaan. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan temperatur dari bawah hingga ke permukaan. Energi panas ini kemudian akan mengalir ke batuan sekitarnya melalui proses konduksi maupun konveksi, yang diilustrasikan pada **Gambar II.6**. Perpindahan panas secara konduksi dapat terjadi ketika perpindahan panas dari batuan sumber panas melalui lapisan batuan yang tidak permeabel hingga ke reservoir panas bumi. Sedangkan perpindahan panas secara konveksi ketika melewati fluida. Perpindahan secara konveksi dapat terjadi di *recharge area* dan reservoir panas (Saptadji, 1998).



Gambar II.6 Perpindahan panas secara konduksi dan konveksi (Saptadji, 1998).

II.3 Magnetotelurik

Metoda magnetotelurik (MT) merupakan salah satu metoda eksplorasi geofisika yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Medan elektromagnetik tersebut terjadi berbagai proses fisik yang cukup kompleks sehingga spektrum frekuensinya sangat lebar (10^{-5} Hz – 10^4 Hz) serta dapat mengukur variasi medan elektromagnetik bumi untuk menginvestigasi struktur tahanan jenis dibawah permukaan hingga 7-10 km di bawah permukaan. Kebergantungan fenomena listrik – magnet terhadap sifat kelistrikan terutama konduktivitas medium (bumi) dapat dimanfaatkan untuk keperluan eksplorasi menggunakan metoda magnetotelurik. Hal ini dilakukan dengan mengukur secara simultan variasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) sebagai fungsi waktu. Informasi mengenai konduktivitas medium yang terkandung dalam data magnetotelurik dapat diperoleh dari penyelesaian persamaan maxwell menggunakan model-model yang relatif sederhana (Grandis, 2007).

II.4 Asumsi dalam Magnetotelurik

Beberapa asumsi penyederhanaan yang dapat diterapkan untuk memahami penjalaran gelombang elektromagnetik pada metode magnetotelurik yaitu (Cagniard, 1953) :

1. Bumi tidak menghasilkan gelombang elektromagnetik, Bumi hanya menyerap gelombang elektromagnetik.
2. Sumber elektromagnetik alami yang dihasilkan relatif jauh dari permukaan bumi, sehingga dianggap seragam dan terpolarisasi bidang dan merambat dalam arah vertikal
3. Akumulasi muatan tidak terjadi pada bumi berlapis
4. Medan listrik dianggap kuasistatik, (Arus pergeseran diabaikan, hanya memperhitungkan arus konduksi) sehingga dianggap induksi elektromagnetik dalam bumi merupakan proses difusi
5. Permittivitas dan permeabilitas batuan dianggap konstan.

II.5 Sumber Sinyal Magnetotelurik

Medan elektromagnetik tersebut ditimbulkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks. Dimana sumber sinyal medan elektromagnetik terbagi atas dua yaitu (Grandis, 2007):

1. Sinyal dengan frekuensi tinggi (>1 Hz)

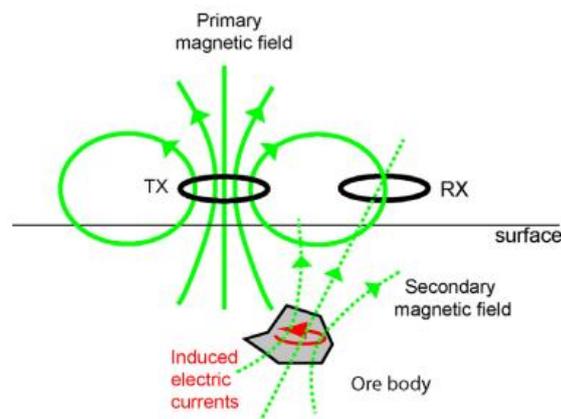
Lightning Activity yang disebabkan oleh aktivitas meteorologis berupa petir. Petir yang terjadi menimbulkan gelombang elektromagnetik yang terperangkap antara ionosfer dengan bumi (wave guide) dan menjalar mengitari bumi.

2. Sinyal dengan frekuensi rendah (<1 Hz)

Solar wind yang mengandung partikel-partikel bermuatan listrik berinteraksi dengan medan magnet permanen bumi.

II.6 Konsep Dasar Magnetotelurik

Konsep gelombang elektromagnetik yang mendasari metode magnetotelurik terdapat pada **Gambar II.7**. Medan elektromagnetik primer yang dibawa oleh *Solar wind* menjalar sampai ke permukaan bumi dengan fluktuasi terhadap waktu kemudian menginduksi bumi. Pada perambatannya, gelombang elektromagnetik merambat konduktif dan tegak lurus. Hal ini dikarenakan adanya sifat udara yang resistif yang menjadi medium perambatan gelombang. Gelombang elektromagnetik yang tertransmisi ke dalam bumi berinteraksi dengan medium yang memiliki nilai resistivitas tertentu. Akibat interaksi ini akan timbul arus listrik, yang akan menginduksi ke permukaan bumi sehingga terjadi arus *eddy* di lapisan permukaan bumi yang dikenal sebagai arus *telluric* serta menghasilkan medan elektromagnetik sekunder. Total dari medan elektromagnetik primer dan elektromagnetik sekunder akan diukur oleh alat magnetotellurik.



Gambar II.7 Konsep gelombang elektromagnetik di bawah permukaan (Unsworth, 2008)

II.6.1 Persamaan Maxwell pada Metode Magnetotelurik

Medan elektromagnetik pada frekuensi apapun secara ringkas digambarkan oleh persamaan maxwell sebagai berikut (Simpson, 2005):

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

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

$$\text{c) } \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\text{d) } \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Dimana:

\vec{E} : medan listrik (Volt/m)

\vec{B} : fluks atau induksi magnetik (Weber/m² atau Tesla)

\vec{H} : medan magnet (Ampere/m)

\vec{j} : rapat arus (Ampere/m²)

\vec{D} : perpindahan listrik (Coulomb/m²)

ρ : rapat muatan listrik (Coulomb/m³)

Persamaan (2.1) diturunkan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menyebabkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang menyebabkannya. Persamaan (2.2) merupakan generalisasi teorema Ampere dengan memperhitungkan hukum kekekalan muatan. Persamaan tersebut menyatakan bahwa medan magnet timbul akibat fluks total arus listrik yang disebabkan oleh arus konduksi dan arus perpindahan. Persamaan (2.3) menjelaskan bahwa medan listrik disebabkan oleh adanya muatan listrik yang berperan sebagai sumbernya, sedangkan Hukum

Kontinuitas Fluks Magnet pada persamaan (2.4) menyatakan bahwa tidak ada medan magnet yang bersifat monopol (Telford,2004).

Tampak bahwa dalam persamaan maxwell yang dinyatakan oleh persamaan (2.1 sampai 2.4) hanya terdapat dua variabel yaitu medan listrik \vec{E} dan medan magnet \vec{H} . Dengan operasi *curl* terhadap persamaan (2.1) dan (2.2) serta mensubstitusikan besaran-besaran yang telah diketahui pada persamaan berikut (Lantu, 2014).

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (2.7)$$

keterangan :

μ = permeabilitas magnetik (Henry/m)

ε = permitivitas listrik (Farad/m)

σ = konduktivitas (ohm-1/m atau siemens/m)

Sehingga persamaan (2.1) dan (2.2) dapat menjadi,

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

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

Kemudian dilakukan operasi curl pada ruas kanan dan kiri pada persamaan (2.8) dan (2.9) sehingga,

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \vec{\nabla} \times \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (2.10)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \vec{\nabla} \times \left(\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \right) \quad (2.11)$$

Subtitusikan persamaan (2.8) dan (2.9) ke persamaan (2.10) dan (2.11) maka dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) + \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) + \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.13)$$

Dengan memperhatikan identitas vektor $\nabla \times (\nabla \times \vec{X}) = (\nabla(\nabla \cdot \vec{X})) - \nabla^2 \vec{X}$ dimana \vec{X} adalah \vec{E} atau \vec{H} , maka didapatkan persamaan untuk gelombang medan listrik dan medan magnet sebagai berikut,

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Perambatan dalam medium bumi menyebabkan gelombang yang merambat memiliki frekuensi rendah maka konduktivitas batuan $\sigma > \varepsilon\omega$. Sehingga persamaan dapat ditulis sebagai berikut (Grandis, 2009) :

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma i\omega \vec{E} \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma i\omega \vec{H} \quad (2.17)$$

$$\text{Dengan: } k^2 = i\omega\sigma\mu_0 \text{ atau } k = \sqrt{i\omega\sigma\mu_0} \quad (2.18)$$

Didapatkan persamaan gelombang elektromagnetik sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{E} = k^2 \vec{E} \quad (2.19)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = k^2 \vec{H} \quad (2.20)$$

II.7 Impedansi Bumi

Impedansi bumi adalah suatu bilangan skalar kompleks yang merupakan fungsi tahanan jenis medium dan frekuensi gelombang elektromagnetik. Impedansi yang

didefinisikan sebagai perbandingan antara komponen medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dapat dituliskan sebagai berikut (Grandis, 2007):

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{i\omega\mu_o\rho} \quad (2.21)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = \sqrt{i\omega\mu_o\rho} \quad (2.22)$$

Dengan:

E_x = komponen medan listrik dalam arah x (Volt/m),

E_y = komponen medan listrik dalam arah y (Volt/m),

H_x = komponen medan magnet dalam arah x (Ampere/meter),

H_y = komponen medan magnet dalam arah y (Ampere/meter),

Z = Impedansi (Ω).

II.8 Penetrasi Kedalaman (*Skin Depth*)

Skin depth didefinisikan sebagai kedalaman pada suatu medium homogen dimana amplitudo gelombang elektromagnetik telah tereduksi menjadi 1/e dari amplitudonya di permukaan bumi (Grandis, 2007). Besaran *skin depth* digunakan untuk memperkirakan kedalaman penetrasi atau kedalaman investigasi gelombang elektromagnetik yang terpenetrasi kedalam bumi. Amplitudo gelombang elektromagnetik mengalami atenuasi secara eksponensial terhadap kedalaman ketika melewati lapisan konduktif. Besaran ini diperoleh dari bilangan gelombang (k) yang dinyatakan sebagai berikut (Vozoff, 1990):

$$k = (1 + i)\alpha \quad (2.23)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu_o\omega\sigma}{2}} = \frac{1}{\delta} \quad (2.24)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.25)$$

Dengan $\delta = \text{Skin depth}$ (m) dan $f = \text{frekuensi}$ (Hz).

II.9 Analisis Tensor

Hubungan antara komponen horisontal medan listrik dan medan magnet merupakan kasus umum untuk medium dimana tahanan-jenis bervariasi terhadap ketiga sumbu x , y dan z . Dalam domain frekuensi, hubungan antara komponen horisontal medan listrik dan medan magnet dinyatakan oleh persamaan matriks berikut (Grandis, 2007) :

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

$$\mathbf{E} = \underline{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{H} \quad (2.27)$$

dimana $\underline{\mathbf{Z}}$ adalah tensor impedansi dengan elemen-elemen bilangan kompleks, selain itu, antara medan magnet horisontal dan medan magnet vertikal terdapat hubungan sebagai berikut :

$$H_z = T_{zx} H_x + T_{zy} H_y \quad (2.28)$$

$$H_z = \mathbf{T} \cdot \mathbf{H} \quad (2.29)$$

dimana \mathbf{T} adalah vektor induksi yang dapat digunakan untuk menghitung parameter yang dikenal sebagai tipper (Grandis, 2007).

II.10 Rotasi

Secara umum, pengukuran sistem koordinat tidak akan bertepatan dengan arah struktur (*strike*) gelombang elektromagnetik. Dalam pengukuran 2D, jika salah satu

arah koordinat ini dirotasikan sepanjang *strike*, nilai dari komponen-komponen impedansi (Z) sebagai berikut (Vozoff, 1990):

$$Z_{2D} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \rightarrow Z_{2D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Secara matematis, tensor impedansi dapat diperoleh dengan sistem koordinat pengukuran melalui rotasi. Untuk memperkirakan arah struktur dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut (Grandis, 2007):

$$\mathbf{Z}^* = \mathbf{R} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{R}^T \quad (2.31)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

dimana \mathbf{Z}^* yaitu tensor impedansi terotasi, \mathbf{R} yaitu matriks rotasi dan θ searah jarum

II.11 Tahanan Jenis

Hubungan antara medan listrik dan medan magnet yang dianalisis dalam metode magnetotelurik menghasilkan nilai tahanan jenis semu dan *phase*. Sehingga nilai tahanan jenis semu dihitung berdasarkan perbandingan antara medan listrik dan medan magnet yang dihasilkan dari persamaan maxwell (Rahadinata,2014). Persamaan ini didasari oleh nilai impedansi gelombang untuk lapisan bumi sedangkan besar nilai fasa diperoleh dari besarnya nilai sudut fasa antara medan listrik dan medan magnet. Dalam hal ini, hubungan tahanan jenis semu, fasa dengan impedansi yang dirotasikan dapat dituliskan sebagai berikut (Beyene, 2012):

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (2.33)$$

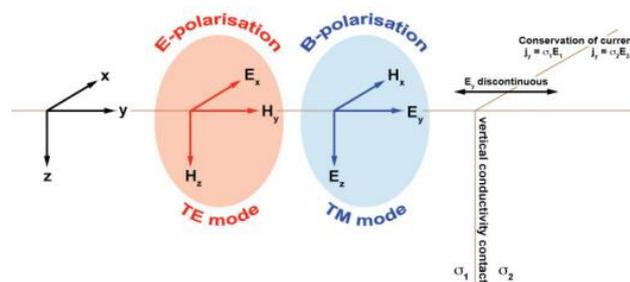
$$\theta_{xy} = \tan^{-1} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \theta_{yx} = \tan^{-1} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (2.34)$$

Dengan ρ = tahanan jenis semu (Ωm) dan θ = fasa impedansi ($^\circ$).

II.12 Pemodelan 2D mode TE dan TM

Untuk merekam gelombang elektromagnetik tersebut maka digunakan dua sensor pada saat akusisi, yaitu sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus. Namun saat proses akusisi, untuk meletakkan kedua sensor ini searah dan tegak lurus dengan *strike* sering mengalami kendala akibat kondisi titik pengukuran yang kurang ideal ataupun sulit untuk menentukan arah yang tepat. Sehingga pada tahap proses pemodelan akan dilakukan rotasi sehingga arah pengukuran akan sesuai dengan struktur geologi.

Pada medium 2D, metode magnetotellurik memiliki dua mode pengukuran yaitu mode TE (*Transverse Electric*) dan mode TM (*Transverse Magnetic*). **Gambar II.8.** Memperlihatkan sebuah model sederhana 2D yang terdiri pada 2 zona pada konduktivitas berbeda, σ_1 dan σ_2 . Akibat dari tidak diskontinu, TM *mode* cenderung ke arah resolusi lateral untuk variasi konduktivitasnya. Sedangkan TE *mode* berasosiasi dengan medan magnetik vertikal. Medan magnetik vertikal menghasilkan gradien konduktivitas lateral yang dapat digunakan untuk mendeteksi kontras konduktivitas.



Gambar II.8 Model sederhana 2D (Beyene, 2012)

Kedua jenis mode tersebut dapat dijelaskan dari persamaan (2.1) dan (2.2) Maxwell yang di awal. Mengingat bahwa struktur resistivitas pada kasus 2D bervariasi terhadap arah y dan z, serta tidak ada variasi pada sumbu x ($\partial/\partial x=0$), maka komponen vektor dari persamaan (2.1) dan (2.2) dapat diuraikan menjadi seperti berikut :

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x \quad ; \quad \frac{\partial H_x}{\partial z} = \sigma E_y \quad ; \quad -\frac{\partial H_x}{\partial y} = \sigma E_z \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_x \quad ; \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu_0 H_y \quad ; \quad \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 H_z \quad (2.36)$$

Nilai resistivitas dari batuan dapat diketahui secara vertikal maupun horizontal sesuai dengan perlapisan batuan. Untuk itu, dapat mengidentifikasi nilai resistivitas tersebut dengan dua *mode* pengukuran magnetotelurik, yaitu (Unsworth, 2008):

1. *Transverse Electric Mode*

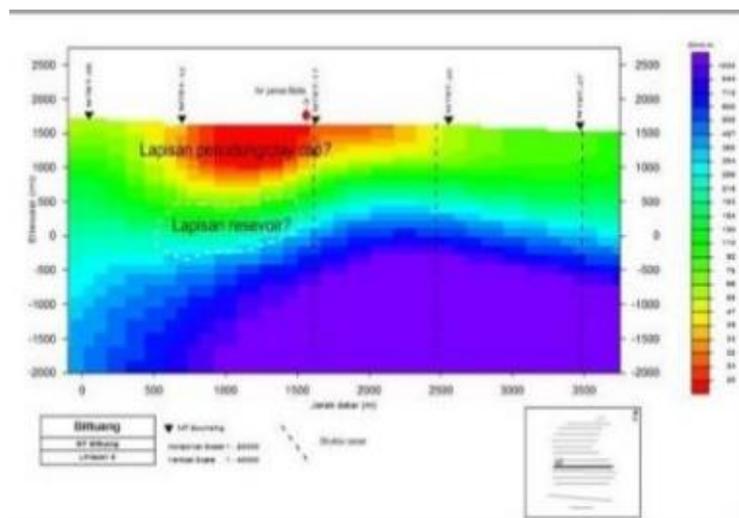
Mode TE (*Transverse Electric*) merupakan komponen yang menunjukkan medan listrik sejajar dengan arah sumbu utama. Pada mode ini komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen magnetiknya saja sedangkan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama. TE memiliki sifat tidak dapat mengalirkan arus listrik melewati batas antara daerah yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda, oleh karena itu komponen \vec{E}_x akan kontinu terhadap bidang sumbu y.

2. *Transverse Magnetic Mode*

Mode TM (*Transverse Magnetic*) merupakan komponen yang menunjukkan bahwa medan magnet sejajar dengan arah struktur utamanya. Pada mode ini komponen

yang menunjukkan pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen medan listrik saja sedangkan komponen medan magnet sejajar dengan arah struktur utama. Pada TM mode, arus listrik akan melewati batas antara bagian yang memiliki perbedaan resistivitas (Nuraini, 2017). Oleh karena itu, TM sangat dimungkinkan terjadi pergeseran statik yang disebabkan adanya heterogenitas resistivitas akibat muatan-muatan yang terkumpul pada batas medium tersebut. Akibat lain pergeseran statik ini adalah nilai resistivitas semu pada frekuensi rendah tetap terlihat sehingga TM akan baik digunakan untuk menganalisa daerah yang memiliki kontras nilai resistivitas yang jelas (Utaminingsih, 2010).

II.13 Hasil Penelitian Sebelumnya



Gambar II.9 Hasil penampang tahanan jenis 2D oleh (Zarasyaki,2019).

Menurut hasil penampang 2D (Zarasyaki,2019) dimana luas sebaran tahanan jenis <50 ohm.m ini mulai mengecil pada kedalaman 750- 1000 meter dan tergantikan oleh nilai tahanan jenis sekitar 50-100 ohm.m. Di atas kedalaman 1000 meter, sebaran tahanan jenis di lokasi-lokasi mata air panas semakin tinggi nilainya.

Diperkirakan pada kedalaman 100-1500 meter ini merupakan zona transisi dari tahanan jenis rendah ke tahanan jenis tinggi. Zona transisi ini diduga sebagai zona batas antara lapisan penudung (batuan teralterasi) dengan lapisan reservoir pada sistem panas bumi daerah penelitian. Pada kedalaman 2000 meter sebaran tahanan jenis didominasi oleh tahanan jenis tinggi, diperkirakan pada kedalaman ini sudah merupakan batuan dasar.