TUGAS AKHIR – RF184838

ANALISIS SENSITIVITAS MODE TE, TM, DAN TE-TM UNTUK INVESTIGASI STRUKTUR PATAHAN DI JAWA TIMUR BAGIAN BARAT MENGGUNAKAN SURVEI MAGNETOTELURIK

RUSBA SAPUTRA RIVENSKY
NRP. 03411640000026

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Amien Widodo, MS
NIP. 19591010 198803 1 002
Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2 003

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – RF184838

ANALISIS SENSITIVITAS MODE TE, TM, DAN TE-TM UNTUK INVESTIGASI STRUKTUR PATAHAN DI JAWA TIMUR BAGIAN BARAT MENGGUNAKAN SURVEI MAGNETOTELURIK

RUSBA SAPUTRA RIVENSKY
NRP. 03411640000026

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Amien Widodo, MS
NIP. 19591010 198803 1 002
Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2 003

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman sengaja dikosongkan

UNDERGRADUATE THESIS – RF184838

ANALYSIS OF TE, TM, AND TE-TM MODE SENSITIVITY FOR FAULT STRUCTURES INVESTIGATION IN EAST JAVA WEST PART USING MAGNETOTELLURIC SURVEY

RUSBA SAPUTRA RIVENSKY
NRP 03411640000026

Supervisors
Dr. Ir. Amien Widodo, MS
NIP. 19591010 198803 1 002
Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2 003

GEOPHYSICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tugas akhir saya dengan judul **"Analisis Sensitivitas Mode TE, TM, dan TE-TM untuk Investigasi Struktur Patahan di Jawa Timur Bagian Barat Menggunakan Survei Magnetotelurik"** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 22 Juni 2020

Rusba Saputra Rivensky
NRP. 03411640000026

Halaman sengaja dikosongkan

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh

Nama	: Rusba Saputra Rivensky
NRP	: 03411640000026
Departemen	: Teknik Geofisika
Judul Tugas Akhir	: Analisis Sensitivitas *Mode* TE, TM, dan TE-TM untuk Investigasi Struktur Patahan di Jawa Timur Bagian Barat Menggunakan Survei Magnetotelurik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 27 Juli 2020

1. .....
   Dr. Amien Widodo, M.S
   NIP. 19591010 198803 1 002 (Pembimbing I)
2. .....
   Wien Lestari, S.T., M.T (Pembimbing II)
   NIP. 19811002 201212 2 003
3. ....
   M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T (Penguji I)
   NIP. 19800916 200912 1002
4. ....
   Anik Hilyah, S.Si., M.T (Penguji II)
   NIP. 19790813 200812 2 002

Menyetujui,
Kepala Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA

.....
Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si., M.Si.
NIP. 19760123 200003 1 00 1

Halaman sengaja dikosongkan

Analisis Sensitivitas Mode TE, TM, dan TE-TM untuk Investigasi Struktur Patahan di Jawa Timur Bagian Barat menggunakan Survei Magnetotelurik

Nama	**:**	**Rusba Saputra Rivensky**
NRP	**:**	**03411640000026**
Departemen	**:**	**Teknik Geofisika**
Pembimbing I	**:**	**Dr. Amien Widodo, M.S**
Pembimbing II	**:**	**Wien Lestari, S.T., M.T.**

ABSTRAK

Pusat Gempa Nasional (PusGeN) (2017) menyatakan bahwa Jawa Timur dilalui oleh beberapa patahan aktif yang memanjang hingga ke arah Bali dan Flores. Penelitian magnetotelurik dilakukan untuk memetakan struktur patahan pada daerah Jawa Timur bagian barat. Kelebihan metode magnetotelurik memiliki penetrasi yang dalam karena bergerak dalam frekuensi rendah sehingga mampu mendeteksi adanya anomaly resistivitas yang diduga sebagai patahan. Lintasan pengukuran metode magnetotelurik membentang meliputi daerah: Lamongan, Gresik, dan Mojokerto. Hasil pengukuran magnetotelurik berupa kurva impedansi TE dan TM yang kemudian akan dilakukan *editting* dan *smoothing* serta diexport dalam format edi. Pada penelitian ini juga membahas sensitivitas dari mode TE, mode TM dan mode TE-TM yang dimodelkan 2D menggunakan inversi *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG). Hasil interpretasi didapatkan terdapatnya struktur patahan yang ditandai dengan adanya kontras resistivitas (30-250 ohm.m) yang memiliki trend arah NE-SW. Hasil pengolahan data dengan menggunakan mode TE memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas secara lateral. Hasil pengolahan data dengan mode TM memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas secara vertikal. Adapun mode TE-TM memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan kontras nilai resistivitas secara lateral mapupun secara vertikal.

Kata Kunci: Inversi NLCG, Mode TE, Mode TM, Mode TE-TM, Resistivitas

Halaman sengaja dikosongkan

Analysis of TE, TM, and TE-TM Mode Sensitivity for Fault Structures Investigation in East Java West Part using Magnetotelluric Survey

Nama	**:**	**Rusba Saputra Rivensky**
Student ID	**:**	**03411640000026**
Department	**:**	**Teknik Geofisika**
Supervisor I	**:**	**Dr. Amien Widodo, M.S**
Supervisor II		**Wien Lestari, S.T., M.T.**

ABSTRACT

The National Earthquake Center (PusGeN) (2017) states that East Java is traversed by several active faults that extends towards Bali and Flores. Magnetoteluric research was conducted to map the faulting structures in the West East Java area. Excess Magnetoteluric method has deep penetration because it moves in low frequencies so as to detect the presence of suspected anomaly resistivity as faulting. The line of measurement of magnetoteluric method extends covering the areas: Lamongan, Gresik, and Mojokerto. The results of magnetoteluric measurements in the form of the TE and TM impedance curve will then be editting and smoothing and export in EDI format. In this study also discussed the sensitivity of the TE mode, TM mode and TE-TM mode which is modeled on 2D using Non-Linear Conjugate Gradient (NLCG) inversion. The interpretation is obtained by a fault structure that is characterized by the presence of contrast resistivity (30-250 ohm. m) which has a trend of NE-SW direction. The results of the data processing using the TE mode have a good sensitivity in the lateral mapping of the resistivity. The result of data processing with TM mode has a good sensitivity in mapping the resistivity vertically. The TE-TM mode has good sensitivity in mapping the contrast of the lateral resistivity value vertically.

Keywords : NLCG Inversion, TE Mode, TM Mode, TE-TM Mode, Resistivity

Halaman sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Rabb Yang Maha Esa atas berkat-Nya laporan tugas akhir yang berjudul "Analisis Sensitivitas Mode TE, TM, dan TE-TM untuk Investigasi Struktur Patahan di Jawa Timur Bagian Barat menggunakan *Survey* Magnetotelurik" ini dapat diselesaikan. Pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini dapat terlaksanakan baik dengan bimbingan, bantuan, dan dukungan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya telah memberi kelancaran dalam mengerjakan Tugas Akhir.
2. Terima kasih juga kepada semua keluarga Rukiah (Bunda), Usman Basyah (Ayah), dan Rivensky Siblings yang telah memberi dukungan do'a, moril, berdiskusi, membantu penulis dalam proses mengerjakan tugas akhir.
3. Dr. Ir. Amien Widodo, MS dan Wien Lestari, S.T., M.T. selaku pembimbing yang telah meluangkan banyak waktu untuk memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
4. M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T. dan Anik Hilyah, S.T., M.T. selaku dosen penguji tugas akhir yang senantiasa memberikan saran hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen serta Civitas Akademik Departemen Teknik Geofisika ITS yang senantiasa membimbing dan mendidik penulis selama masa perkuliahan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
6. Ade Sababurrohmah, Nadia Putri Luckytasari, Yusril Muzakki, Bagoes Idcha Mawardi, Thufeil Amr Adausy, Aisya Nur H., Nugroho Syarif, Catur Rizkillah, Ikhwan, yang telah memberi dukungan do'a, moril, berdiskusi, membantu penulis dalam proses mengerjakan tugas akhir.
7. Seluruh keluargaku Teknik Geofisika ITS angkatan 2016 (TG05) atas semangat dan dukungannya selama menjalani kuliah.
8. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat dituliskan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa pengembangan keilmuan tidak berhenti pada satu hasil. Kritik dan saran maupun diskusi diperlukan agar kebermanfaatan laporan tugas akhir ini semakin dirasakan bagi penulis pribadi maupun bagi pembaca.

Surabaya, 23 Juni 2020

Penulis

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL I
HALAMAN PENGESAHAN I
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR I
ABSTRAK V
ABSTRACT VII
KATA PENGANTAR IX
DAFTAR ISI XI
DAFTAR GAMBAR XIII
DAFTAR TABEL XV
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 2
1.3. Batasan Masalah 2
1.4. Tujuan Penelitian 3
1.5. Manfaat Penelitian 3
1.6. Target Luaran 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1. Geologi Regional 5
2.1.1 Geologi Regional dan Fisiografi 5
2.1.1.1. Stratigrafi 6
2.1.1.2. Sejarah Geologi 9
2.2. Metode Magnetotelurik 12
2.2.1. Sumber dan Penjalaran Gelombang MT 13
2.2.2. Persamaan Maxwell 14
2.2.3. Tensor Impedansi 15
2.2.4. Mode Pengukuran Magnetotelurik 18
2.2.5. *Skin Depth* 19
2.2.6. Static Shift 20
2.2.7. Inversi 2D *Non-Linear Conjugate Gradient (NLCG)* 22
2.2.8. Resistivitas Batuan dalam Study Magnetotellurik 23
2.3. Penelitian Terdahulu 24
BAB III METODOLOGI 35
3.1. Akuisisi Data Magnetotelurik 35
3.2. Diagram Alir Penelitian 36
3.3. Tahapan Penelitian 37
3.3.1. Studi Literatur 37
3.3.2. Persiapan Data 38
3.3.3. *Line Profilling* 38
3.3.4. Koreksi *Static Shift* dan *Smoothing* 38
3.3.5. Pemodelan Inversi 1-D 40
3.3.6. Pemodelan 2D *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG) 43

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 45
4.1 Interpretasi 45
4.1.1 Interpretasi 1D *Line 1* 45
4.1.2 Interpretasi 2D *Line* 2 48
4.2 Distribusi Resistivitas Kedalaman 51
4.3 Pembahasan 55
BAB V SIMPULAN DAN SARAN 59
5.1 Simpulan 59
5.2 Saran 59
DAFTAR PUSTAKA 61
BIOGRAFI PENULIS 67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta Fisiografi Jawa Timur (Van Bemmelen, 1949) 6
Gambar 2. 2 Kolom Stratigrafi Komposit Jawa Timur (Prasetyadi, 2007), dengan Penambahan Kurva Eustasi Global (Haq, dkk., 1987)..... 7
Gambar 2. 3 Tatanan Lempeng Tektonik di Eosen Akhir [kiri] dan saat Oligosen Awal [kanan] (Hall, 2012).....10
Gambar 2. 4 Tatanan Lempeng Tektonik di Oligosen Akhir [kiri] dan akhir Miosen Bawah [kanan] (Hall, 2012).....10
Gambar 2. 5 Tatanan Lempeng Tektonik di Miosen Akhir [kiri], dan akhir Pleistosen [kanan] (Hall, 2012).....11
Gambar 2. 6 Pola Struktur Jawa selama Miosen Awal Hinga Miosen Akhir..12
Gambar 2. 7 Tipe gelombang magnetotellurik a) Badai matahari dan b) Lightning Discharge (Kauffman dan Keller, 1981). 13
Gambar 2. 8 Interaksi gelombang EM dengan medium bawah permukaan bumi (Unsworth, 2007) 13
Gambar 2. 9 Skema Timbulnya Gelombang Magnetotelurik (Grandis, 2013) 14
Gambar 2. 10 Skema Mode TE dan TM pada Model 2D (Simpson dan Bahr, 2005).....18
Gambar 2. 11 Fenomena pergeseran static akibat heterogenitas dekat permukaan (Sulistyo dkk., 2015) 20
Gambar 2. 12 Fenomena pergeseran static akibat perbedaan topografi (Sulistyo dkk., 2015) 21
Gambar 2. 13 Fenomena pergeseran static akibat kontak vertical (Sulistyo dkk., 2015).....22
Gambar 2. 14 Hasil Pemodelan data magnetotelurik line 2.....24
Gambar 2. 15 Penampang model tahanan jenis 2D (Awaludin, dkk. 2017)....25
Gambar 2. 16 Penampang model tahanan jenis 2D pada daerah panas bumi Cangar (Rahmawati, dkk. 2017) 26
Gambar 2. 17 Hasil Pemodelan 2D Line 1 (Jasman, 2018).....27
Gambar 2. 18 Hasil Pemodelan 2D Line 2 (Jasman, 2018).....27
Gambar 2. 19 Model inversi NLCG MT 2-D (Al Basri, 2018) 28
Gambar 2. 20 Model inversi NLCG MT 2-D (Darmawan, 2018).....29
Gambar 2. 21 Hasil pemodelan X-section untuk line 1 (a). data dengan mode TE, (b) data dengan mode TM (Nuraini, 2017) 30
Gambar 2. 22 Hasil pemodelan 2-D data magnetotelurik (a) data dengan mode TE, (b) data dengan mode TM (Nuraini, 2017) 31
Gambar 2. 23 Interpretasi pemodelan inversi 2-D lintasan 1 (a) mode TE (b) mode TM dan (c) mode TE-TM (Luckytasari, 2019) 32

Gambar 2. 24 Interpretasi pemodelan inversi 2-D lintasan 2 (a) mode TE (b) mode TM dan (c) mode TE-TM (Luckytasari, 2019)..... 32

Gambar 3. 1 Desain Pengukuran Metode Magnetotelurik……...35
Gambar 3. 2 Susunan Alat Metoda Magnetotelurik…….36
Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian……37
Gambar 3. 4 *Elevation Map*…… 38
Gambar 3. 5 Data MTLA-1 sebelum dilakukan koreksi *static shift*…… 40
Gambar 3. 6 Data MTLA-1 setelah dilakukan koreksi *static shift*……...40
Gambar 3. 7 Pemodelan 1D dengan Menggunakan Mode TE……..41
Gambar 3. 8 Pemodelan 1D dengan Menggunakan Mode TM……41
Gambar 3. 9 Pemodelan 1D dengan Menggunakan Mode Invariant……...42
Gambar 3. 10 *Setting Parameter 1D*……42
Gambar 3. 11 *Forward Modelling*……... 43
Gambar 3. 12 Parameter Inversi 2-D……44

Gambar 4. 1 Pemodelan 2-D dengan Mode TE……46
Gambar 4. 2 Pemodelan 2-D dengan Mode TM……..47
Gambar 4. 3 Pemodelan 2-D dengan Mode TE-TM……48
Gambar 4. 4 Pemodelan 2-D dengan Mode TE……49
Gambar 4. 5 Pemodelan 2-D dengan Mode TM……..50
Gambar 4. 6 Pemodelan 2-D dengan Mode TE-TM……51

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai resistivitas batuan yang diperkirakan terdapat di daerah penelitian (Telford dkk., 1990 dengan modifikasi).....24

Tabel 4. 1 Distribusi Resistivitas Kedalaman 52
Tabel 4. 2 Analisis mode TE, mode TM, dan mode TE-TM.....57

Halaman sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks (Bird, 2003). Keberadaan interaksi antar lempeng-lempeng ini menempatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi (Milson dkk, 1992). Korban materi maupun jiwa manusia akibat bencana gempa bumi lebih banyak disebabkan karena ketidaktahuan akan adanya patahan di suatu daerah, sehingga tidak ada langkah antisipasi menghadapi pergerakan patahan itu. Oleh karena itu pemetaan patahan aktif sangat diperlukan untuk pengembangan tata ruang di Indonesia karena mulai sekarang pembangunan bangunan harus melihat aspek kebencanaan salah satunya gempa bumi.

Studi Geodetik menggunakan Global Positioning System (GPS) telah dilakukan terhadap pengukuran deformasi permukaan di Pulau Jawa (Koulali dkk, 2016). Koulali, dkk. (2016) mengidentifikasi sebuah ekstensi atau perpanjangan aktif *Flores back-arc thrust* ke arah barat sepanjang 300 km di darat menuju Jawa Timur sepanjang Patahan Kendeng. Hasil penelitian ini mengindikasi ancaman gempa besar baru untuk Jawa Timur dan ancaman tsunami ke Bali, Lombok, Nusa Tenggara, dan pantai-pantai lainnya di sepanjang Laut Flores. Informasi mengenai sesar-sesar di dekat permukaan menjadi dasar kajian penelitian deformasi pada daerah yang lebih dalam. Wilayah Surabaya dan sekitarnya dilalui oleh beberapa struktur geologi diantaranya adalah patahan aktif Lidah dan Patahan Kedung Waru yang berasosiasi dengan Antiklin Lidah, Antiklin Gayungan dan Antiklin Kedung Waru (Lembar Geologi PPPG, 1992) sehingga menyebabkan wilayah Surabaya dan sekitarnya berpotensi terjadinya gempa. Pusat Gempa Nasional (PusGeN) melakukan pemuktahiran peta gempa nasional 2017 dengan ditemukannya patahan-patahan aktif baru termasuk di Zona Kendeng Jawa Timur antara lain Patahan Surabaya, Patahan Waru, Patahan Blumbang, dan Patahan Cepu. Patahan bergerak dengan pergeseran sekitar 0.05 mm dengan besar magnitudo < 7 (PusGeN, 2017). Akan tetapi, data atau penelitian mengenai dimensi dan kedalaman patahan di wilayah Surabaya dan sekitarnya masih belum lengkap.

Metode magnetotelurik merupakan metode elektromagnetik pasif untuk menentukan konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman puluhan meter hingga ribuan meter (Simpson dan Bahr, 2005). Adanya struktur geologi diidentifikasi dengan adanya kontras resistivitas yang memiliki *trend* arah tertentu, kontras nilai resistivitas ini sangat tergantung terhadap fluida atau

material pengisi patahan tersebut. Penelitian ini diharapkan menghasilkan informasi secara komprehensif dan lebih detail tentang proses deformasi struktur bawah permukaan Jawa Timur bagian barat dilihat dari distribusi resistivitas bawah permukaan.

Penelitian ini juga membahas analisis sensitivitas perbandingan pemodelan resistivitas bawah permukaan pada data magnetotelurik dengan mode TE (*transverse electric*), mode TM (*transverse magnetic*) dan mode TE-TM. Mode TE menunjukkan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama. Sedangkan mode TM menunjukkan komponen medan magnet sejajar dengan arah struktur utama (Unsworth, 2007). Perbandingan mode TE dan mode TM terhadap pemodelan 2-D data magnetotelurik telah dilakukan pada beberapa penelitian. Luckytasari (2019) melakukan penelitian menggunakan metode magnetotelurik pada lapangan panasbumi Arjuno Welirang. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa mode TE memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas rendah (konduktif) secara lateral, mode TM memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas tinggi secara vertikal dan mode TE-TM memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan kontras nilai resistivitas secara lateral mapupun secara vertikal. Selain itu, pada penampang mode TE tidak terlihat adanya respon dari struktur, sedangkan pada penampang mode TM dan mode TE-TM menunjukkan adanya struktur. Oleh karena pentingnya pemahaman lebih lanjut mengenai hal tersebut, maka dalam penelitian ini akan dikaji lebih dalam mengenai pengaruh mode TE (*Transverse Electric*), mode TM (*Transverse Magnetic*) dan mode TE-TM terhadap investigasi struktur geologi di Jawa Timur bagian Barat

1.2. Rumusan Masalah

Adapun masalah yang dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menganalisis perbandingan pemodelan nilai resistivitas resistivitas bawah permukaan data magnetotelurik dengan menggunakan mode TE, mode TM, dan mode TE-TM.
2. Bagaimana identifikasi struktur patahan dari hasil pengolahan data magnetotelurik.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini meliputi:

1. Pemodelan 2D Magenetotellurik yang dilakukan menggunakan inversi Non-Linear Conjugate Gradient (NLCG).
2. Data yang digunakan berupa data primer (*.EDI) dalam domain frekuensi.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis perbandingan pemodelan nilai resistivitas bawah permukaan data magnetotelurik dengan menggunakan mode TE (*transverse electric*), mode TM (*transverse magnetic*) dan mode TE-TM.
2. Identifikasi struktur patahan dari hasil pengolahan data magnetotelurik.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai bawah permukaan dan struktur geologi aktif dapat menjadi studi pendahuluan bagi kajian kebencanaan khusunya gempa bumi di daerah Jawa Timur bagian barat dan sekitarnya. Studi yang berkelanjutan mengenai pergerakan patahan aktif di daerah penelitian selanjutnya dapat menjadi data primer mitigasi bencana pemerintah daerah dengan membuat peta resiko gempa di daerah penelitian.

1.6. Target Luaran

Luaran yang ingin didapatkan dari penelitian ini adalah publikasi berupa artikel jurnal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

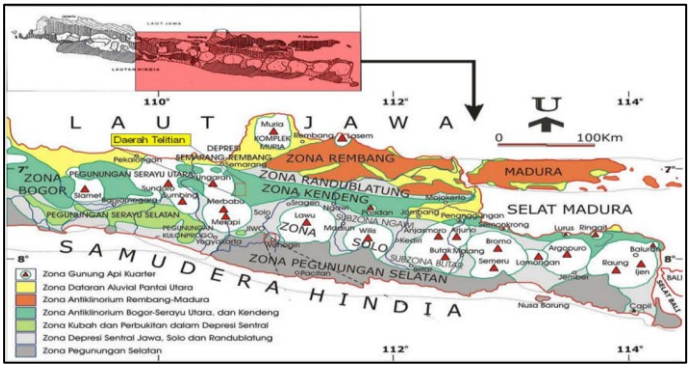
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geologi Regional

2.1.1 Geologi Regional dan Fisiografi

Menurut Van Bemmelen (1949), fisiografi bagian timur Pulau Jawa dibedakan menjadi 5 zona, yaitu: Zona Pegunungan Selatan, Zona Solo, Zona Pegunungan Kendeng, Zona Depresi Randublatung, dan Zona Rembang. Daerah penelitian secara fisiografi terletak di Antiklinorium Rembang/Zona Rembang (Rembang Zone) dimana batuan pembentuknya terdiri atas endapan laut dangkal, sedimen klastik, dan batuan karbonat. Secara umum, ada tiga arah pola umum struktur yaitu arah Timur Laut–Barat Daya (NE-SW) yang disebut pola Meratus, arah Utara–Selatan (N-S) atau pola Sunda dan arah Timur–Barat (E-W). Adanya perubahan jalur penunjaman berumur kapur yang berarah Timur Laut – Barat Daya (NE-SW) menjadi relatif Timur–Barat (E-W) yang terjadi sejak kala Oligosen sampai sekarang telah menghasilkan tatanan geologi Tersier di Pulau Jawa yang sangat rumit (Sribudiyani, 2003). Penampang stratigrafi yang diberikan oleh Kusumadinata, 1975 dalam Pulunggono, 1994 menunjukkan bahwa ada dua kelompok cekungan yaitu kelompok cekungan Jawa Utara bagian barat yang mempunyai bentuk geometri memanjang relatif utara-selatan dengan batas cekungan berupa sesar-sesar dengan arah utara selatan dan timur-barat. Sedangkan cekungan yang terdapat di kelompok cekungan Jawa Utara Bagian Timur umumnya mempunyai geometri memanjang timur-barat dengan peran struktur yang berarah timur-barat lebih dominan.

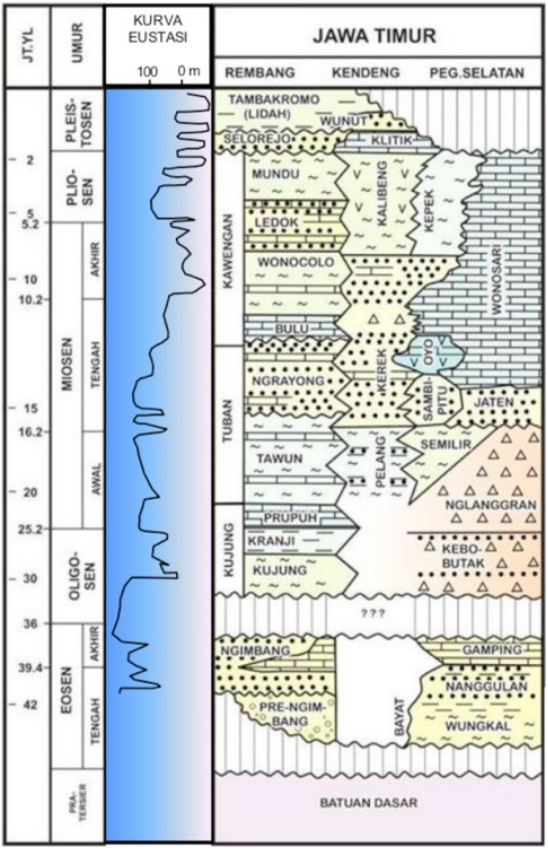
Pada akhir Cretasius terbentuk zona penunjaman yang terbentuk di daerah Karangsambung menerus hingga Pegunungan Meratus di Kalimantan. Zona ini membentuk kerangka struktur geologi yang berarah timurlaut-baratdaya. Kemudian selama tersier pola ini bergeser sehingga zona penunjaman berada di sebelah selatan Pulau Jawa. Pada pola ini struktur yang terbentuk berarah timur-barat. Tumbukan antara lempeng Asia dengan lempeng Australia menghasilkan gaya utama kompresi utara-selatan. Gaya ini membentuk pola sesar geser (*oblique wrench fault*) dengan arah baratlaut-tenggara, yang kurang lebih searah dengan pola pegunungan akhir Cretacius (Sribudiyani, 2003). Pada periode Pliosen-Pleistosen arah tegasan utama masih sama, yaitu utara-selatan, aktivitas tektonik periode ini menghasilkan pola struktur naik dan lipatan dengan arah timur-barat yang dapat dikenali di Zona Kendeng. Secara umum, Pulau Jawa terdapat struktur geologi aktif yang didominasi oleh sesar geser dan sesar naik dengan sesar turun yang menjadi struktur minor. Berdasarkan peta sumber dan bahaya gempa nasional yang dikeluarkan oleh Pusat Gempa Nasional (PusGeN) (2017) menyatakan bahwa Jawa Timur dilalui oleh beberapa patahan aktif yang memanjang hingga ke arah bali dan flores, antara lain Patahan Surabaya, Patahan Waru, Patahan Blumbang, dan Patahan Cepu.



Gambar 2. 1 Peta Fisiografi Jawa Timur (Van Bemmelen, 1949)

2.1.1.1. Stratigrafi

Stratigrafi regional Zona Rembang menurut Pringgoprawiro (1983), stratigrafi daerah penelitian dari tua ke muda termasuk ke dalam Formasi Tawun, Anggota Ngrayong Formasi Tawun, Formasi Bulu, Formasi Wonocolo, Formasi Ledok, Formasi Mundu, dan Endapan Aluvium Undak Solo.



Gambar 2. 2 Kolom Stratigrafi Komposit Jawa Timur (Prasetyadi, 2007), dengan Penambahan Kurva Eustasi Global (Haq, dkk., 1987)

1) Formasi Kujung

Formasi Kujung dicirikan dengan adanya batuan napal dan lempung napalan, abu-abu kehijauan, kuning kecoklatan sisipan batugamping bioklastik, keras, mengandung foraminifera besar dan ganggang (Pringgoprawiro, 1983).

2) Formasi Prupuh

Formasi Prupuh dicirikan dengan adanya batugamping bioklastik, berlapis tebal, keras, kaya akan fosil *Orbitoid* (Pringgoprawiro, 1983). Formasi ini tersebar secara luas dan menempati jalur sempit dan memanjang pada Tinggian Tuban.

3) Formasi Tuban

Stratotipe dari formasi ini merupakan suatu urut-urutan batuan terdiri dari batulempung yang monoton dengan sisipan batugamping (Pringgoprawiro, 1983). Formasi Tuban mempunyai penyebaran yang luas di daerah Paciran dan Tuban. Semakin ke selatan mendekati Mandala Kendeng, Formasi Tuban diduga bersilang jari dengan Formasi Pelang.

4) Formasi Tawun

Formasi Tawun dikenal dengan adanya suatu seri batuan pasiran terdiri dari perulangan batupasir dan serpih pasiran berwarna khas kuning coklat kemerahan hingga jingga dengan sisipan batugamping Orbitoid. Ciri litologi pada formasi ini yang didasarkan pada sumur pemboran Tawun-5, Formasi Tawun dimulai dengan adanya lempung setebal 50 meter yang kemudian diikuti oleh perulangan batugamping pasiran, dimana semakin ke atas batupasirnya semakin mengandung lapisan-lapisan tipis lignit. Batupasir ini merupakan batuan yang dominan untuk bagian atas dari Formasi Tawun dan diberi nama Anggota Ngrayong. Pada lokasi Ngrayong, anggota ini terdiri dari batupasir kwarsa lepas setebal 72 meter (Pringgoprawiro, 1983).

5) Formasi Bulu

Formasi Bulu dikenal dengan batugamping hingga batugamping pasiran, berwarna putih kekuningan, kecoklatan hingga keabu-abuan, keras, kompak, berlapis tipis (berpelat) hingga pejal, banyak mengandung foraminifera besar, koral, ganggang, dan foraminifera kecil (Pringgoprawiro, 1983).

6) Formasi Wonocolo

Formasi Wonocolo dikenal dengan adanya batuan napal, napal lempungan hingga napal pasiran, kaya akan fosil foraminifera plankton, berwarna abu-abu kehijauan hingga abu-abu kecoklatan dengan perselingan kalkarenit (Pringgoprawiro, 1983).

7) Formasi Ledok

Formasi Ledok dicirikan dengan adanya perulangan antara napal pasiran, kalkarenit dengan napal dan batupasir (Pringgoprawiro, 1983)

8) Formasi Mundu

Formasi Mundu dikenal dengan adanya napal kehijauan, berwarna kuning jika kondisi lapuk, masif, kaya sekali akan foraminifera plankton, dan tidak belapis (Pringgoprawiro, 1983).

9) Formasi Lidah

Formasi Lidah dicirikan dengan batulempung kebiruan, napal berlapis dengan sisipan batupasir (Pringgoprawiro, 1983). Penyebaran dari formasi ini berkembang di sepanjang depresi Randublatung, mulai sekitar Purwodadi hingga Antiklin Lidah di daerah Surabaya. Sedangkan di Mandala Rembang formasi ini berkembang mulai dari Pati hingga Tuban. Formasi ini bersilang jari dengan

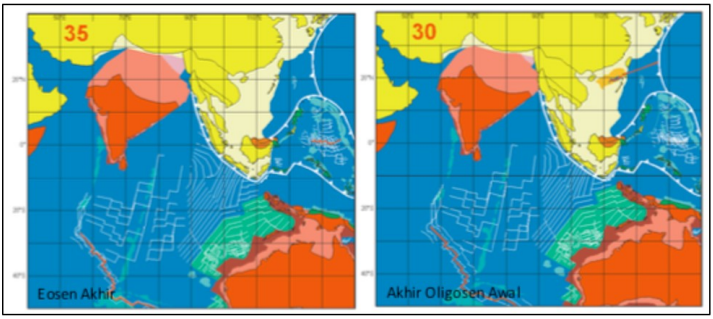
Formasi Sonde dan Formasi Pucangan dari Mandala Kendeng di daerah Mojokerto dan Sidoarjo.

2.1.1.2. Sejarah Geologi

Dalam teori tektonik lempeng, terdapat istilah konvergen, divergen, dan transform. Divergen merupakan pergerakan lempeng-lempeng yang bergerak, dimana lempeng yang satu bergerak menjauhi lempeng yang lainnya. Konvergen merupakan pergerakan lempeng-lempeng yang bergerak saling mendekati antara satu lempeng dengan lempeng lainnya. Sedangkan transform merupakan pergerakan lempeng-lempeng tektonik yang saling berpapasan yang kemudian saling bergeseran antara satu dengan lainnya dengan arah yang berbeda. Adanya pergerakan lempeng-lempeng ini disebabkan karena adanya gaya, baik itu gaya kompresional maupun gaya tensional. Teori dasar tektonika lempeng inilah yang membuat terbentuknya struktur-struktur patahan, lipatan, dll.

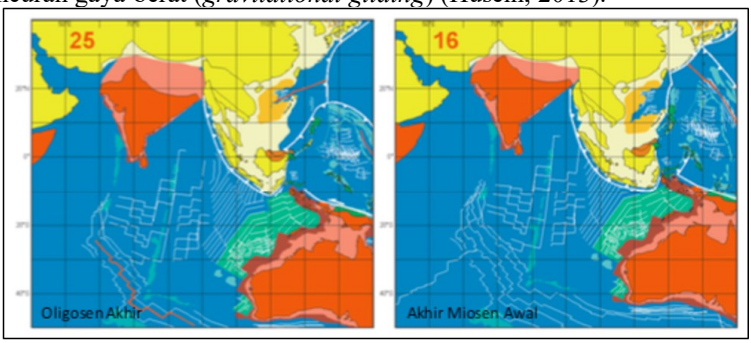
Memasuki Eosen Tengah, proses pemekaran Samudera Hindia mulai akan berlangsung di selatan Benua Australia, menyebabkan mulai terjadinya subduksi di Palung Sunda (Gambar 2.3) sehingga menyebabkan terbentuknya cekungan-cekungan sedimenter Tersier di *Sundaland*. Terjadinya regresi membuat proses sedimentasi syn-rift dapat terbentuk dengan baik di cekungan-cekungan tersebut, termasuk Jawa Timur, seperti: Formasi-Formasi Wungkal-Gamping dan Nanggulan. Di Jawa Timur utara, Formasi pra-Ngimbang dan Ngimbang diendapkan dengan baik. Seluruh formasi tersebut merekam pengaruh fluktuasi muka laut global dengan adanya ketidakselarasan di akhir Eosen Tengah (Novian dan Husein, 2014).

Di akhir Eosen Atas, sedimentasi *syn-rift* terhenti akibat peristiwa transgresi global. Pada akhir Oligosen Bawah proses penunjaman Palung Sunda yang terjadi semenjak Eosen Tengah mulai membentuk busur gunungapi (*volcanic arc*), yang berada di Zona Pegunungan Selatan. Kehadiran busur gunungapi memicu terbentuknya zona cekungan (*back-arc basin*), yaitu Zona Kendeng. Pada bagian Jawa Timur utara, pada saat terjadinya Formasi Kujung mulai diendapkan di lingkungan paparan hingga lereng benua (Novian dan Husein, 2014).



Gambar 2. 3 Tatanan Lempeng Tektonik di Eosen Akhir [kiri] dan saat Oligosen Awal [kanan] (Hall, 2012)

Saat Oligosen Akhir, kolisi Benua Australia dan *Sundaland* dimulai (Gambar 2.5). Akibatnya *Sundaland* mulai mengalami rotasi berlawanan arah jarum jam (*anti-clockwise rotation*), yang dapat mengaktifkan patahan-patahan *basement* (*basement faults*) yang sebelumnya aktif sebagai sesar normal saat periode *rifting* di Eosen Tengah menjadi sesar geser. Rotasi Oligo-Miosen ini terekam dengan baik di Zona Rembang, dimana sedimentasi batugamping Prupuh di lingkungan terumbu menempati tinggian-tinggian batuan alas (*basement horst)* yang terinversi naik akibat penyesaran geser mengiringi naiknya genang laut saat itu. Selain itu, rotasi ini diduga menyebabkan kelanjutan penurunan tektonis Zona Kendeng, yang kemudian memicu munculnya kompleks batuan alas (*basement core complex*) Bayat di tepian cekungan akibat peluncuran gaya-berat (*gravitational gliding*) (Husein, 2013).

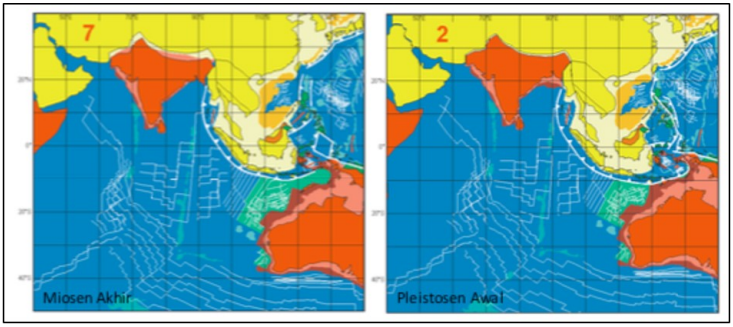


Gambar 2. 4 Tatanan Lempeng Tektonik di Oligosen Akhir [kiri] dan akhir Miosen Bawah [kanan] (Hall, 2012)

Memasuki akhir Miosen Awal, terjadinya pengungkitan segmen lempeng *Sundaland.* Peristiwa ini menyebabkan berakhirnya periode puncak volkanisme Pegunungan Selatan. Terjadinya ketidakselarasan di Zona Rembang yang dihasilkan melalui peristiwa tektonik yang dikenal dengan nama Tuban *Event*,

yang memicu sedimentasi batupasir kuarsa Formasi Ngrayong secara masif dan luas. Pada Zona Kendeng terjadinya sedimentasi Formasi Kerek yang diendapkan pada lingkungan yang lebih dangkal dibandingkan Formasi Pelang (Novian dan Husein, 2014).

Pada pertengahan Miosen Akhir, lempeng *Oxfordian-Albian* telah masuk ke Palung Sunda secara merata (Gambar 2.6). Karena lempeng tersebut lebih tua, sehingga lebih berat, maka kemudian secara regional terjadi reaktivasi penurunan cekungan belakang busur (*back-arc basin subsidence*) Zona Kendeng. Peristiwa ini secara stratigrafis ditandai dengan sedimentasi Formasi Kalibeng yang diendapkan pada lingkungan lebih dalam dibandingkan Formasi Kerek di bawahnya. Penurunan Zona Kendeng memicu kesetimbangan isostatis baru, dengan reaktifasi patahan bongkah (*block-faulting*) di Pegunungan Selatan dan Zona Rembang. Pada Zona Rembang, terjadi penurunan sebagian bongkah-bongkah batuan alas mengontrol pengendapan sikuen Ledok-Mundu-Selorejo bersamaan dengan naiknya genang laut saat awal Pliosen. Peristiwa penyesaran bongkah ini di Jawa Timur utara dikenal dengan nama Rembang Event (Novian dan Husein, 2014).

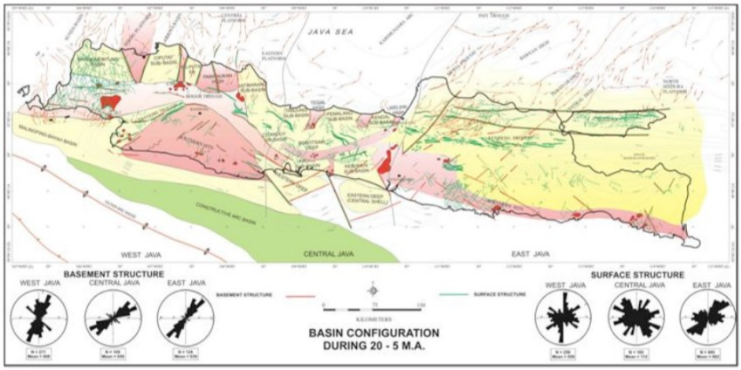


Gambar 2. 5 Tatanan Lempeng Tektonik di Miosen Akhir [kiri], dan akhir Pleistosen [kanan] (Hall, 2012)

Memasuki awal Pleistosen kolisi Timur dengan Busur Volkanik Sunda mulai terjadi (Gambar 2.6). Hal ini memicu pengangkatan regional di Pulau Jawa. Pegunungan Selatan mengalami pengangkatan paling intensif kemudian diimbangi secara isostatis oleh pembentukan Zona Depresi Solo. Zona Kendeng mengalami pengangkatan tidak merata, dimana bagian barat mengalami inversi dengan kuat, sedangkan bagian timur justru tetap melanjutkan penurunannya. Hal ini dikontrol oleh perbedaan sudut kemiringan subduksi *lempeng Oxfordian-Albian*, yang semakin curam ke arah timur karena usia kerak yang semakin tua. Perbedaan sudut subduksi antara bagian timur dan barat ini juga mengaktifkan tektonisme sesar geser (*wrench tectonic*) di Zona Rembang, menghasilkan Antiklinorium Rembang yang terkontrol pola patahan batuan alas (*basement*

faults). Pengangkatan Zona Kendeng bagian barat dan Zona Rembang tersebut pun diimbangi secara isostatis dengan pembentukan Zona Depresi Randublatung (Novian dan Husein, 2014).

Seluruh peristiwa tektonik tersebut di atas terekam dalam kompleksnya pola struktur yang dijumpai di Jawa Timur, baik di permukaan maupun pada



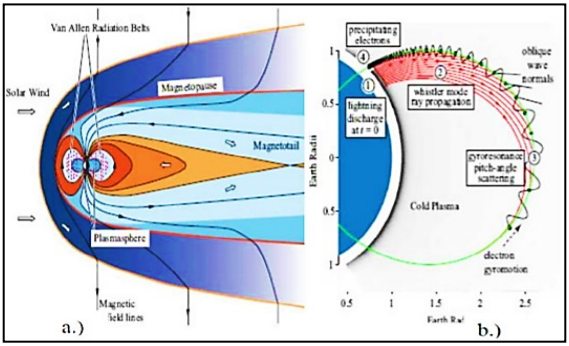
Gambar 2. 6 Pola Struktur Jawa selama Miosen Awal Hinga Miosen Akhir

2.2. Metode Magnetotelurik

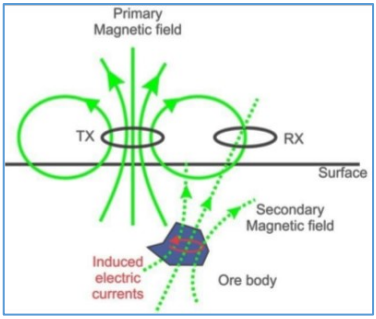
Metode magnetotelurik merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik pasif dengan melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi dari kedalaman beberapa meter hingga ratusan kilometer. Metode magnetotelurik menggunakan frekuensi dengan kisaran 10^{-5} Hz - 10^{3} Hz (Simpson dan Bahr, 2005). Magnetutellurik merupakan salah satu metode geofisika yang dinilai paling baik digunakan dalam eksplorasi panas bumi karena kemampuannya untuk memetakan nilai resistivitas batuan sistem panas bumi (Oskooi, 2006). Selain itu metode ini juga mampu untuk memetakan struktur geologi bawah permukaan (Lestari, dkk. 2018). Metode Magnetotelurik mengukur dua komponen orthogonal medan listrik (E) dan tiga komponen orthogonal medan magnet (H). Rasio dari medan listrik dan medan magnet merupakan nilai resistivitas semu yang kita kenal sebagai tensor impedan (Z).

Pada frekuensi yang cukup rendah (kurang dari 1 Hz), solar wind yang mengandung partikel-partikel bermuatan listrik berinteraksi dengan medan magnet permanen bumi sehingga menyebabkan variasi medan elektromagnetik. Variasi pada jangkah frekuensi audio (*audio frequency band*, di atas 1 Hz) terutama disebabkan oleh aktivitas meteorologis berupa petir. Petir yang terjadi di suatu tempat menimbulkan gelombang elektromagnetik yang terperangkap

antara ionosfer dan bumi *(wave guide)* dan menjalar mengitari bumi (Grandis, 2013). Penjelasan tersebut akan diterangkan pada gambar 2.10 berikut;



Gambar 2. 7 Tipe gelombang magnetotellurik a) Badai matahari dan b) Lightning Discharge (Kauffman dan Keller, 1981).



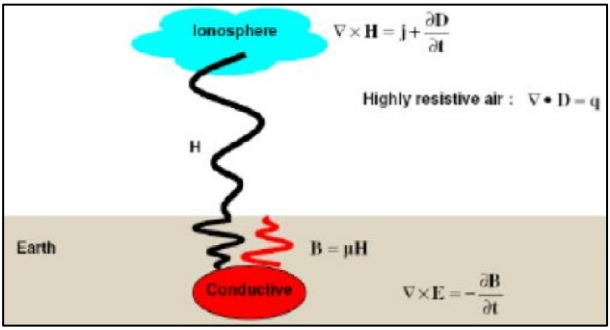
Gambar 2. 8 Interaksi gelombang EM dengan medium bawah permukaan bumi (Unsworth, 2007)

Medan elektromagnetik alami (medan elektromagnetik primer) sebagai sumber metode magnetotellurik sampai ke bumi dengan memiliki variasi terhadap waktu. Medan elektromagnetik tersebut menginduksi ore body di bawah permukaan Bumi sehingga sehingga timbul *eddy current* (arus telluric) yang menghasilkan medan elektromagnetik sekunder. *Receiver* (RX) yang berada di permukaan menangkap total medan elektromagnetik sebagai penjumlahan dari medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder (Chave and Jones, 2012).

2.2.1. Sumber dan Penjalaran Gelombang MT

Pada dasarnya bumi memiliki medan magnet yang konstan, namun dalam metode Magnetotelluric tidak membutuhkan medan magnet yang konstan,

melainkan medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu dapat men-generate medan listrik. Variasi medan elektromagnetik dapat berasal dari petir ataupun interaksi dari solar wind dengan lapisan magnetosphere Bumi. Medan elektromagnetik dengan frekuensi lebih dari 1 Hz berasal dari aktivitas meteoreologi seperti lightning discharge (cahaya petir). Sinyal petir oleh cahaya dikenal sebagai sferics dan mencakup rentang frekuensi elektromagnetik. Sferic menjalar dalam *waveguide* sebagai gelombang listrik transversal (TE), magnetik transversal (TM), atau gelombang listrik dan magnetik transversal (TE-TM). Interaksi antara solar wind dengan lapisan Magnetosphere dan Ionosphere bumi menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi kurang dari 1 Hz. Solar wind adalah suatu aliran yang kontinu dari plasma, memancarkan sebagian besar proton dan elektron dari Matahari. Pada saat solar wind mengenai medan magnet terrestrial pada magnetopause, proton dan elektron akan berdefleksi ke arah yang berlawanan sehingga menimbulkan medan listrik (Grandis, 2013). Adapun skema yang dihasilkan oleh gelombang Magenetotellurik digambarkan pada gambar 2.11 berikut.



Gambar 2. 9 Skema Timbulnya Gelombang Magnetotelurik (Grandis, 2013)

2.2.2. Persamaan Maxwell

Persamaaan Maxwell merupakan sintesa hasil-hasil eksperimen (empiris) mengenai fenomena listrik- magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coloumb dan yang dilakukan oleh Maxwell sendiri. Penggunaan persamaan tersebut dalam metode MT telah banyak diuraikan dalam buku-buku pengantar geofisika khususnya yang memebahas metode EM

Dalam bentuk differensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut (Grandis, 2013):

$$\nabla \, x \, \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \qquad \text{Hukum Faraday} \qquad (1)$$

$$\nabla \, x \, \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \boldsymbol{t}} \qquad \text{Hukum Ampere} \qquad (2)$$

$\nabla . \boldsymbol{D} = q$ Hukum Gauss (3)

$\nabla . \boldsymbol{B} = 0$ Hukum Gauss dalam magnetisasi (4)

dimana,

E : medan listrik (Volt/m)

B : fluks atau induksi magnetic (Weber/m^2 atau Tesla)

H : medan magnet (Ampere/m)

j : rapat arus (Ampere/m^2)

D : pergeseran muatan listrik (Columb/m^2)

q : rapat muatan listrik (Columb/m^3)

Persamaan (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) merupakan generalisasi terorema 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 (3) menyatakan hukum Gauss yaitu fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut. Sedangkan persamaan (4) yang identik dengan persamaan (5) berlaku untuk medan magnet, namun dalam hal ini tidak ada monopol magnetik (Grandis, 2013).

2.2.3. Tensor Impedansi

Metode Magnetotellurik (MT) dinilai paling baik digunakan dalam eksplorasi panas bumi karena kemampuannya untuk memetakan nilai resistivitas batuan sistem panas bumi. Metode tersebut mengukur dua komponen orthogonal medan listrik (E) dan dua komponen orthogonal medan magnet (B). Rasio dari medan listrik dan medan magnet merupakan nilai resistivitas semu yang kita kenal sebagai tensor impedansi (Z). Secara umum, medan listrik, medan magnetik, dan impedansi memiliki hubungan yang linier, sehingga dapat dirumuskan dengan persamaan berikut (Jupp and Vozoff, 1977):

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (5)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (6)$$

Menurut Smirnov (2003) medan listrik, medan magnet, dan impedansi secara eksplisit memiliki hubungan linier yang dapat dirumuskan pada persamaan 7 sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Zxx & Zxy \\ Zyx & Zyy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Hx \\ Hy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ex \\ Ey \end{bmatrix} \tag{7}$$

Dimana,

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \tag{8}$$

dimana [Z] merepresentasikan tensor impedansi.

Hx(ω), Hy(ω), Ex(ω), dan Ey(ω) adalah transformasi Fourier dari perubahan medan magnetik (H) dan medan listrik (E). Apabila diasumsikan Bumi 1-D maka nilai impedansi dapat ditunjukkan pada persamaan (Jupp and Vozoff, 1977) :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1+i)\left(\frac{\omega\mu}{2\sigma}\right)^{1/2} \tag{9}$$

dimana,

E_x = medan listrik pada arah x $\left(\frac{V}{m}\right)$

H_y = medan magnet pada arah y $\left(\frac{A}{m}\right)$

ω = frekuensi angular

μ = permeabilitas magnetik $\left(\frac{H}{m}\right)$

k = bilangan gelombang

Resistivitas semu (ρa) untuk lapisan Bumi dapat diperoleh dari persamaan berikut (Jupp danVozoff, 1977) :

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu}\left|\frac{E_x}{H_y}\right|^2 \tag{10}$$

Apabila kita asumsikan bumi homogen maka nilai resistivitas semu harus sama pada setiap frekuensi dan medan listrik akan berada di atas medan magnetik pada fase 45 derajat untuk semua frekuensi. Kemudian nilai resistivitas semu dan fase tersebut diplot pada grafik resistivitas semu terhadap frekuensi dan fase terhadap frekuensi. Dua modus independen dari impedansi dianalisis untuk analisis pendekatan Bumi 2-D dalam sistem koordinat Kartesian dengan y searah dengan arah *strike* dan x tegak lurus terhadap arah *strike*.

Modus *Transverse Electric* (TE) adalah modus yang medan listriknya searah dengan *strike*, sedangkan modus *Transverse Magnetik* (TM) adalah modus yang

medan magnetiknya searah dengan *strike*. Bagian diagonal dari impedansi tensor untuk pendekatan Bumi 2-D adalah nol (Fiona Simpson and Bahr, 2005).

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

dimana,

$$Z_{yx} = Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} \tag{12}$$

$$Z_{xy} = Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} \tag{13}$$

Dengan mengasumsikan data yang diperoleh dengan menggunakan sistem koordinat (x', y') dan sistem koordinat struktural (x, y) dimana y searah dengan *strike*, data MT dirotasi dari (x', y') ke (x, y). Jika sudut rotasi dari (x', y') ke (x, y) adalah θ maka kita dapat menerapkan matriks rotasi (F. Simpson and Bahr, 2005) :

$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \tag{14}$$

sehingga,

$$E = RE' \text{ dan } H = RH' \tag{15}$$

Sudut rotasi (θ) di atas dapat ditentukan dengan melakukan rotasi tensor impedansi secara meningkat atau dapat dihitung secara analitik berdasarkan persamaan berikut :

$$\theta = \frac{1}{4} tan^{-1}\left(\frac{2R_1 R_2 + I_1 I_2}{{R_1}^2 + {I_1}^2 - {R_2}^2 - {I_2}^2}\right) \tag{16}$$

$$\text{dimana, } \begin{cases} R_1 = R_e(Z_{xx} - Z_{yy}) \\ I_1 = I_m(Z_{xx} - Z_{yy}) \\ R_2 = R_e(Z_{xy} - Z_{yx}) \\ I_2 = I_m(Z_{xy} - Z_{yx}) \end{cases} \tag{17}$$

Tensor impedansi, $\underline{Z}$ merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Oleh karena itu, masing – masing komponen, Z_{ij} dan Z tidak hanya memiliki besar, tetapi juga memiliki fase sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut (Fiona dan Karsten, 2005):

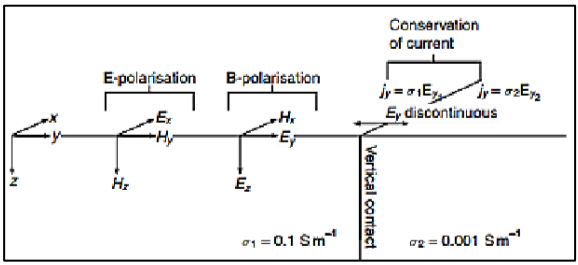
$$\rho_{a,ij}(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left|Z_{ij}(\omega)\right|^2 \tag{18}$$

$$\Phi_{ij} = \tan^{-1}\left(\frac{Im\{Z_{ij}\}}{Re\{Z_{ij}\}}\right) \quad (19)$$

2.2.4. Mode Pengukuran Magnetotelurik

Nilai resistivitas dapat bervariasi secara vertikal maupun horizontal. Pada kenyataannya, perlapisan batuan tidak terjadi secara menerus, di titik tertentu bisa terdapat patahan atau terobosan dari batuan lain, sehingga terbentuk bidang batas antara 2 zona yang memiliki perbedaan nilai resistivitas. Untuk mengidentifikasi nilai resistivitas secara horizontal, medan magnet dan medan listrik yang saling tegak lurus satu sama lain, dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan mode TE dan TM. Skema mode TE dan TM digambarkan pada gambar 2.13.

Dalam mode TE, arus listrik tidak akan mengalir melewati batas antara daerah yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda, oleh karena itu komponen Ex akan kontinu terhadap bidang sumbu y, demikian juga dengan yang akan kontinu terhadap bidang sumbu y. Karena itulah TE mode sangat baik jika masih menggunakan analisa 1-dimensi (Unsworth, 2007).



Gambar 2. 10 Skema Mode TE dan TM pada Model 2D (Simpson dan Bahr, 2005)

Mode TE (*Transverse Electric*) atau polarisasi-E merupakan mode ketika medan listrik yang menginduksi sejajar dengan arah strike (Ex) menyebabkan medan magnet bervariasi pada arah tegak lurus strike (By) dan arah vertikal (Bz):

$$\frac{\partial Ex}{\partial y} = \frac{\partial Bz}{\partial t} = i\omega Bz \quad (20)$$

$$\frac{\partial Ex}{\partial z} = \frac{\partial By}{\partial t} = -i\omega By \quad (21)$$

$$\frac{\partial Bz}{\partial y} = \frac{\partial By}{\partial z} = \mu\sigma Ex \quad (22)$$

Pada mode TE komponen yang menunjukkan pada bidang arah sumbu y dan z hanya komponen magnetiknya saja sedangkan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama.

Mode TM (*Transverse Magnetic*) atau polarisasi-B merupakan mode ketika medan magnet yang menginduksi sejajar dengan arah strike (Bx) menyebabkan medan magnet bervariasi pada arah tegak lurus strike (Ey) dan arah vertikal (Ez):

$$\frac{\partial Bx}{\partial y} = \mu_0 \sigma Ez \tag{23}$$

$$-\frac{\partial Bx}{\partial z} = \mu_0 \sigma Ey \tag{24}$$

$$\frac{\partial Ez}{\partial y} = \frac{\partial Ey}{\partial z} = i\omega Bx \tag{25}$$

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. Dalam TM mode ini, terjadi fenomena efek konduktif yang terjadi juga pada TE mode, namun pada mode ini terjadi juga efek lain yaitu efek statik yang disebabkan adanya heterogenitas resistivitas medium, sehingga muatan-muatan terkumpul pada batas medium tersebut. Adanya efek statik tersebut menyebabkan nilai resistivitas semu pada frekuensi rendah (Unsworth, 2007).

2.2.5. *Skin Depth*

Skin depth merupakan kedalaman pada suatu medium yang dianggap homogen dengan resistivitas (ρ) dimana *amplitude* gelombang elektromagnetik tereduksi menjadi 1/*e* dari amplitudonya di permukaan bumi (*In e* = 1, dimana *e* = 2.718, dan nilai $e^{-1} = \delta$), maka dapat dituliskan:

$$\delta = \frac{1}{real\ (k)} = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \tag{26}$$

Medan elektromagnetik memiliki siat dimana apabila medan elektromagnetik melewati lapisan konduktif maka energi dari medan elektromagnetik tersebut akan teratenuasi. Jarak tembus dari medan elektromagnetik tersebut juga akan berkurang mengikuti seberapa besar nilai konduktifitas dari lapisan konduktif ketika melewati lapisan tersebut, jarak maksimum yang dapat dicapai oleh medan elektromagnetik saat menembus lapisan konduktif ini dinamakan *skin depth*. Nilai *skin depth* dipengaruhi oleh

resistifitas bahan dan frekuensi yang digunakan. Hubungan ini dapat dikembangkan dari persamaan 26 menjadi persamaan 27 berikut:

$\mu = 4\pi.10^{-7}$

$\omega = 2\pi f$

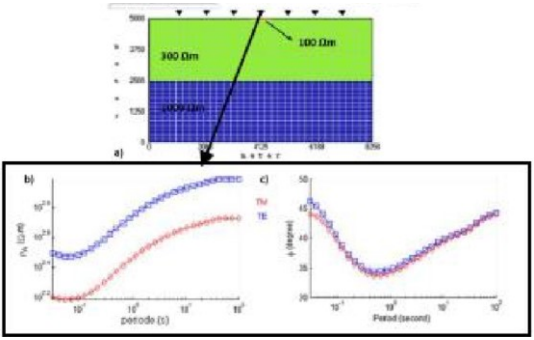
$\rho = 1/\sigma$

Maka;

$$\delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{T}} \tag{27}$$

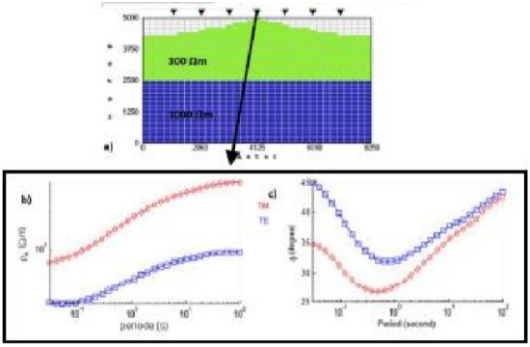
2.2.6. Static Shift

Static shift didefinisikan sebagai perpindahan vertikal dari resistivitas semu pada kurva sounding antara titik pengukuran (stasiun) yang berdekatan atau antara dua kurva pada stasiun yang sama, tanpa mengalami perbedaan baik kondisi kurva maupun fase-nya. *Static shift* disebabkan oleh medan listrik yang dihasilkan dari muatan-muatan pada batas permukaan yang tidak homogen (Vozoff, 1991). Menurut Zarkasyi (2019), metode magnetotelurik memiliki kelemahan yang muncul akibat efek statik yang disebabkan oleh heterogenitas lokal di permukaan dan juga adanya pengaruh faktor topografi. Medan listrik yang dihasilkan dari boundary *charges* mereduksi nilai medan listrik yang terukur, juga menurunkan nilai impedansi, merendahkan resistivitas semu dari bagian yang memiliki resistivitas rendah. Pada bagian yang resistif, medan listrik mengalami penguatan sehingga membuat daerah tersebut lebih resistif. Hal ini mengakibatkan efek heterogenitas permukaan akan mempengaruhi semua frekuensi pada titik-titik pengukuran. Dampaknya adalah pengukuran MT akan tergeser ke atas jika melewati lapisan yang resistif dan sebaliknya akan tergeser ke bawah jika melewati lapisan konduktif sesuai gambar 2.14 (Sulistyo dkk., 2015).



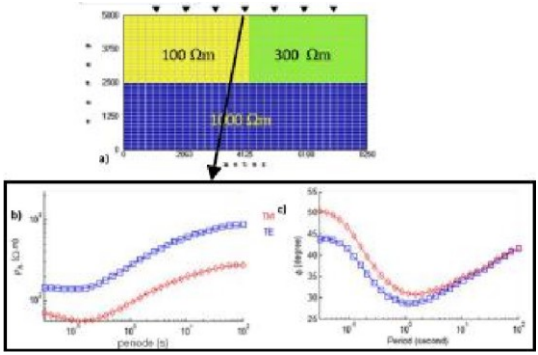
Gambar 2. 11 Fenomena pergeseran static akibat heterogenitas dekat permukaan (Sulistyo dkk., 2015)

Perbedaan topografi yang mencolok juga mengakibatkan *terjadinya static shift*. Perbedaan topografi akan menghasilkan medan listrik paling rendah berada di puncak dan paling tinggi berada di lembah sehingga resistivitas terendah yang terukur berada di puncak dan resistivitas tertinggi yang terukur berada dilembah semakin besar pula pergeseran static yang terjadi sesuai pada gambar 2.15.



Gambar 2. 12 Fenomena pergeseran static akibat perbedaan topografi (Sulistyo dkk., 2015)

Sedangkan kontak vertikal adalah kondisi dimana dua buah formasi batuan yang memiliki nilai resistivitas yang kontras dan saling kontak satu sama lain secara vertikal. Pada bagian yang lebih resistif, kurva *Transverse Magnetic* (TM) akan berada diatas kurva *Transverse Electric* (TE). Pada kasus ini, *static shift* tersebut tidak terjadi pada periode tinggi. *Static shift* akan terjadi pada semua periode jika stasiun pengukuran terletak tepat pada kontak vertikal sesuai gambar 2.16 (Sulistyo dkk., 2015).



Gambar 2. 13 Fenomena pergeseran static akibat kontak vertical (Sulistyo dkk., 2015)

2.2.7. Inversi 2D *Non-Linear Conjugate Gradient (NLCG)*

Pada model 2D, terdapat variasi nilai resistivitas pada arah lateral dan vertikal yang terdiri dari blok-blok tertentu. Medium yang ada didiskritasi menjadi blok dengan geometri tetap sehingga parameter model adalah nilai resistivitas untuk tiap blok. Ukuran blok tidak dibuat seragam untuk menggambarkan resolusi data Magnetotelurik yang berkurang terhadap jarak dan kedalaman dari titik pengamatan, serta untuk penerapan syarat batas pada penyelesaian persamaan diferensial medan elektromagnetik (mode TE dan mode TM) secara numerik menggunakan finite difference (Grandis, 2009).

Pada bagian ini akan menjelaskan secara singkat tentang teori inversi. Secara umum problem inversi adalah suatu cara yang dapat meminimumkan *error* kuadrat, yaitu dengan menggunakan persamaan 28 (Rodi dan Mackie, 2001).

$$||e|| = ||d\text{-}F(m)||^2 \tag{28}$$

Dengan e adalah vektor *error*, F adalah vektor fungsi *forward modeling*, m adalah parameter model dan d adalah vektor data. Agar solusi menjadi stabil, perlu persamaan tambahan sebagai fungsi penstabil. Penyelesaian problem dengan persamaan tambahan ini disebut fungsi regularisasi (Rodi dan Mackie, 2001). Persamaan regularisasi dapat dilihat pada persamaan 29. Ψ adalah fungsi objektif yang akan diminimumkan, $||d\text{-}F(m)||^2$ adalah *data misfit*, λ adalah pengali Lagrange, dan *R* adalah regularisasi yang berfungsi sebagai *stabilizer*.

$$\Psi(m,\lambda) = ||d\text{-}F(m)||^2 + \lambda.R(m) \tag{29}$$

Inversi NLCG adalah suatu inversi yang terdiri dari 2 *loop*, yaitu *loop conjugate-gradient* dan *loop line-searh* yang dapat meminimumkan suatu fungsi (Rodi & Mackie, 2001). *Loop* sekunder melakukan *line-search*. Minimisasi fungsi objektif menjadi problem minimisasi satu dimensi dengan parameter alfa ($\min\Psi(\alpha)$). *Line-search* inilah yang sifatnya non-linier (Rodi dan Mackie, 2001). Inversi NLCG lebih baik dalam meminimumkan fungsi dibandingkan dengan metode *steepest descent*. Yang mana metode *steepest descent* bergerak zig-zag dalam menurunkan fungsi. Sedangkan NLCG bergerak seperti arah *conjugate gradient*. Beberapa skema dalam *line-search* ini adalah:

1. Nilai fungsi objektif terkecil disimpan sebagai $\Psi_{best}(\alpha_{best})$.
2. Jika fungsi objektif dalam tahap iterasi line-search lebih besar dari Ψ_{best}, dilakukan bisection.
3. Sebaliknya, jika fungsi objektif iterasi saat ini lebih kecil dari Ψ_{best}, dilakukan pengecekan, apakah turunan beda tanda.

$$\propto_{k+1} = \frac{1}{2}(\propto_k + \propto_{best}) \tag{30}$$

   3.1. Jika turunan beda tanda, berarti mungkin kedua titik telah mengapit lokasi minimum. Untuk kasus ini dilakukan interpolasi kubik untuk aproksimasi lokasi minimum.

   3.2. Jika turunan sama tanda, dilakukan aproksimasi kuadratik.

Loop utama adalah loop *conjugate gradient* yang berguna untuk menghitung arah *conjugate*. Setelah arah *conjugate* ditemukan, dilakukan minimisasi 1 dimensi (*line-search*). Setelah minimisasi 1 dimensi selesai (untuk tiap iterasi), dilakukan pengecekan tiga *flag* (Rodi dan Mackie, 2001)

2.2.8. Resistivitas Batuan dalam Study Magnetotellurik

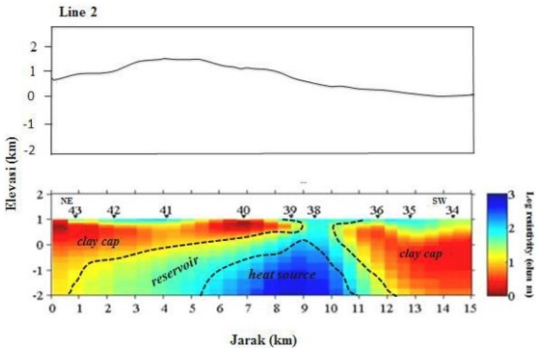
Pengukuran magnetotelurik menghasilkan informasi tentang nilai resistivitas terhadap kedalaman. Nilai resistivitas yang dihasilkan memiliki rentang nilai paling rendah hingga tingggi. Nilai rendah adalah benda yang bersifat sangat konduktif sedangkan yang tinggi adalah benda yang bersifat resistif. Adapun rujukan nilai resistivitas batuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Nilai resistivitas batuan yang diperkirakan terdapat di daerah penelitian (Telford dkk., 1990 dengan modifikasi)

Jenis Batuan	Resistivitas (Ωm)	Jenis Batuan	Resistivitas (Ωm)
Lempung	1-100	Limestones	50 - 10^7
Lanau	10-200	Marl	3 – 70
Alluvium dan Pasir	10 - 800	Breksi	75-200
Batupasir	50-500	Konglomerat	2x103-104

2.3. Penelitian Terdahulu

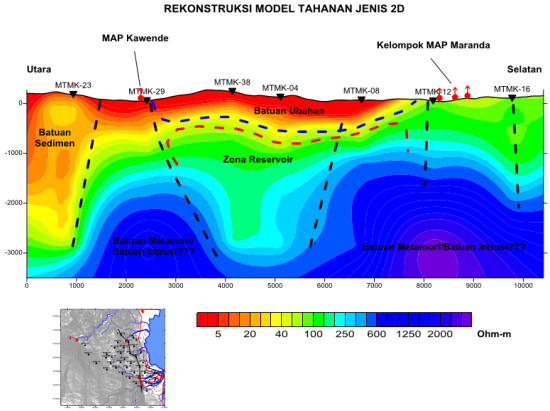
Rachmaningtias dkk. (2014) melakukan penelitian identifikasi struktur resistivitas daerah geothermal "T" berdasarkan hasil pemodelan 2D data magnetotelurik. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui karakteristik panas bumi area geothermal "T". Berdasarkan hasil pemodelan 2D data magnetotelurik menunjukkan bahwa persebaran struktur resisitivitas dengan nilai 0-10 Ωm dengan ketebalan 1 km dikatakan sebagai clay cap. Zona reservoir dengan nilai 10-100 Ωm pada kedalaman 1-2 km, sedangkan zona heat source berada pada kedalaman 2-3 km, dengan nilai resistivitas 100-1000 Ωm. Dari hasil persebaran struktur resistivitas dapat digambarkan area yang berprospek geothermal seluas 12 km^2 sesuai pada gambar 2.17 berikut.



Gambar 2. 14 Hasil Pemodelan data magnetotelurik line 2

Pada tahun 2017, Awaludin, dkk. melakukan penelitian dengan menggunakan metode magnetotellurik pada daerah panasbumi Maranda yang terletak di Kabupaten Poso, Sulawesi Tengah. Penelitian tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui struktur tahanan jenis bawah permukaan yang berkorelasi dengan sistem panas bumi. Pengukuran MT di daerah panas bumi

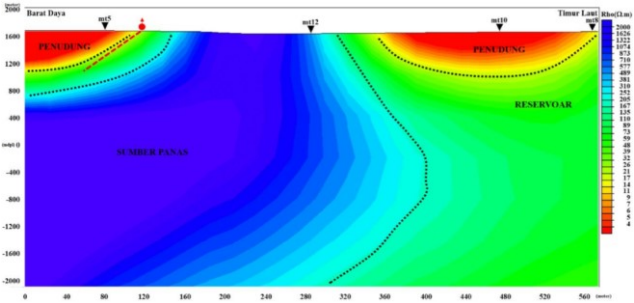
Maranda dilakukan pada 42 titik ukur yang tersebar membentuk 8 buah lintasan berarah barat daya-timur laut dengan jarak antar titik ukur sekitar 1000 m.



Gambar 2. 15 Penampang model tahanan jenis 2D (Awaludin, dkk. 2017)

Peta tahanan jenis (MT) memperlihatkan adanya pola kelurusan berarah barat laut-tenggara dengan sebaran tahanan jenis tinggi di sebelah barat daya dan sebaran tahanan jenis rendah di sebelah timur laut. Batuan penudung yang dicirikan dengan nilai tahanan jenis rendah berada di sebelah timur laut di antara mata air panas Maranda dan mata air panas Kawende dengan pola yang membuka ke arah timur laut. Batuan penudung ini diperkirakan berada di dekat permukaan hingga kedalaman 750 meter dengan ketebalan 500-750 meter.

Pada tahun 2017, Rahmawati, dkk. juga melakukan penelitian menggunakan metode magnetotelurik pada daerah panas bumi Cangar, Jawa Timur. Penelitian tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui persebaran resistivitas sehingga dapat diketahui sistem panas bumi yang ada di daerah penelitian. Akusisi data magnetotelurik dilakukan sebanyak 11 titik dengan spasi 70 meter sampai 150 meter yang terbagi menjadi 5 lintasan.

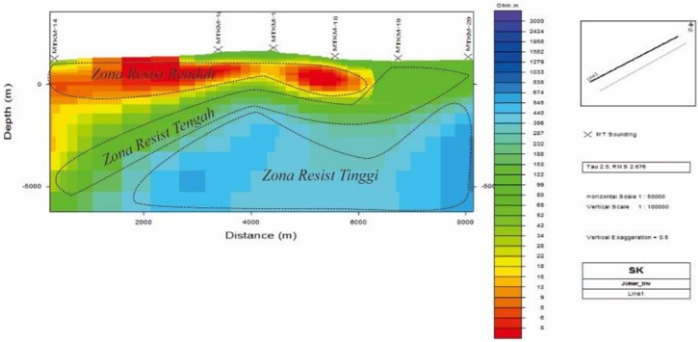


Gambar 2. 16 Penampang model tahanan jenis 2D pada daerah panas bumi Cangar (Rahmawati, dkk. 2017)

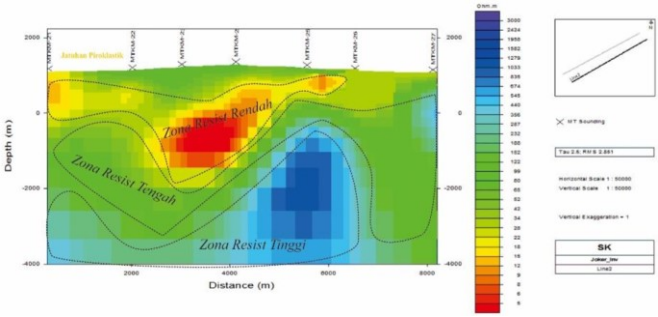
Berdasarkan hasil pengolahan data magnetotelurik diperoleh rentang nilai resistivitas berkisar antara 4 Ω.m – 2000 Ω.m. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem panas bumi di daerah Cangar terdiri dari lapisan penudung (≤21 Ω.m), lapisan reservoar (21 Ω.m – 167 Ω.m) dan lapisan sumber panas (≥167 Ω.m). Panas bumi Cangar diduga dikontrol oleh patahan Cangar.

Penelitian magnetotelurik juga pernah dilakukan oleh Lestari, dkk. Pada tahun 2018. Penelitian ini dilakukan pada daerah yang padat aktivitas manusia. Dimana penelitian tersebut secara umum dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan gambaran struktur geologi di daerah Jawa Timur yang berorientasi barat-timur dan utara-selatan. Secara khusus untuk memetakan zona patahan aktif Kendeng. Untuk memetakan zona patahan aktif Kendeng dilakukan pengukuran magnetotelurik sebanyak 12 titik pengukuran yang membentang dari utara ke selatan memotong pulau jawa sepanjang 178 km. lintasan pengukuran ini meliputi wilayah Gresik, Lamongan, Surabaya, Mojokerto, Jombang, Kediri, Blitar, dan Trenggalek.

Pada tahun 2018, Jasman melakukan penelitian terhadap lapangan panas bumi “SK”, dimana lapangan ini didominasi oleh lava andesit-basaltik dan jatuhan piroklastik, selain itu lapangan panas bumi ini juga ditandai dengan munculnya manifestasi panasbumi, berupa: steam ground, air panas, dan fumarol. Data magnetotellurik yang diperoleh diolah menggunakan pemodelan inversi 1D Occam, cross section 1D modelling, dan inversi 2D NLCG menggunakan perangkat lunak WinGLink. Hasil pemodelan 2D dilakukan pendekatan dengan hasil pemodelan 1D untuk menghilangkan efek galvanik pada lapisan dangkal dengan membandingkan nilai resistivitas pada kurva pemodelan 1D dengan kurva misfit 2D dan hasil model *cross section* 1D dengan model 2D.



Gambar 2. 17 Hasil Pemodelan 2D Line 1 (Jasman, 2018)

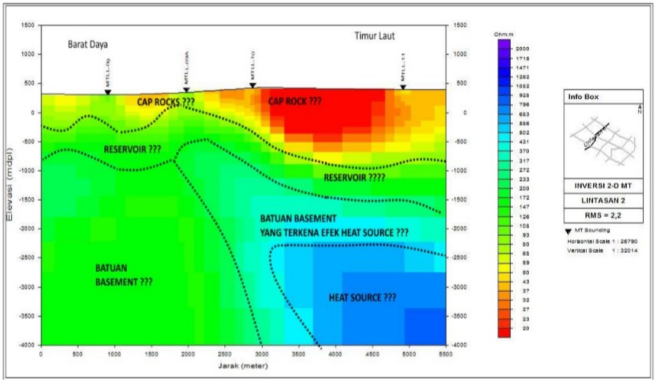


Gambar 2. 18 Hasil Pemodelan 2D Line 2 (Jasman, 2018)

Sistem panas bumi lapangan "SK" berada pada wilayah formasi Lava "B3" yang terdiri dari lapisan cap rock dengan nilai resistivitas 5-20 Ωm pada kedalaman 1000-2000 meter, lapisan reservoir dengan nilai resistivitas 150-350 Ωm di kedalaman 2000-2500 meter dan berdasarkan hasil pemodelan dapat diamati terdapatnya kelurusan sesar pada wilayah penelitian yang terlihat pada kontras resistivitasnya.

Alif Al Basri juga telah melakukan penelitian dengan tema "Pemodelan Inversi 2D *Data Magnetotellurics* pada Lapangan Panas Bumi "Basri" Sulawesi Barat". Daerah penelitiannya tersebut, secara geologi terbentuk akibat aktifitas sesar geser yang menciptakan gawir sesar yang berbentuk setengah radial dan menimbulkan zona depresi. Dimana *heat source* diperkirakan dari sisa panas dapur magma yang berasosiasi dengan aktivitas plutonik muda berumur kuarter. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan Metode Magnetotellurik dengan sebaran titik ukur berjumlah 19 titik dengan total lintasan pengukuran sebanyak enam lintasan. Lintasan satu sampai dengan tiga mempunyai arah

lintasan barat laut – tenggara dan lintasan empat sampai dengan enam mempunyai arah lintasan barat daya – timur laut. Tahapan pengolahan meliputi konversi data domain waktu menjadi domain frekuensi, seleksi crosspower, proses smooting data, koreksi efek static, parameterisasi inversi 2-D, dan interpretasi model inversi. Pemodelan data magnetotelurik menggunakan metode inversi *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG) menghasilkan model inversi magnetotelurik 2-D. Dimana nilai RMS pada masing – masing model inversi secara keseluruhan dibawah 2,5 %.

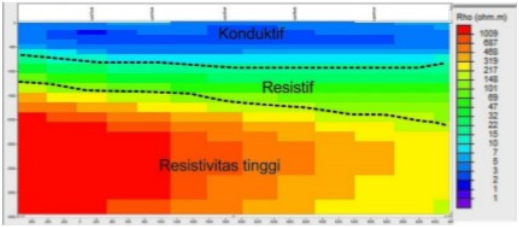


Gambar 2. 19 Model inversi NLCG MT 2-D (Al Basri, 2018)

Dalam penelitian Al Basri tersebut menghasilkan model inversi yang dapat diinterpretasikan menggunakan parameter berupa nilai resistivitas dan informasi geologi. Nilai resistivitas dengan rentang nilai 20 – 50 ohm meter diperkirakan sebagai lapisan cap rock, nilai 100-250 ohm meter diduga sebagai lapisan reservoir panas bumi, diatas 250 ohm meter diprediksi sebagai lapisan heat source. Lapisan cap rock menebal kearah barat laut dan timur laut dengan ketebalan bervariasi dari 100 – 1500 meter, lapisan reservoir mempunyai ketebalan konstan sebesar 500 meter dan lapisan heat source menebal kearah tenggara dan timur laut dengan ketebalan lebih dari 2000 meter.

Penelitian yang melakukan pemodelan inversi 2D data magnetotellurik dengan menggunakan inversi *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG) juga pernah dilakukan oleh Crismanto Darmawan. Dimana Darmawan melakukan penelitian pada daerah panas bumi Paralana. Daerah penelitiannya tersebut merupakan hot dry rock system. Dalam penelitiannya, Darmawan menggunakan metode magnetotellurik karena karena penetrasinya yang sangat dalam dan sensitivitasnya terhadap zona konduktif. Pada penelitiannya dilakukan pemodelan inversi 2D data magnetotelurik daerah Paralana menggunakan algoritma NLCG dengan tujuan menganalisis distribusi resistivitas bawah permukaannya. Hasil pemodelan inversi merupakan penampang resistivitas

bawah permukaan dengan nilai rms dibawah 5%, hal ini menunjukkan model yang diperoleh adalah model yang baik.

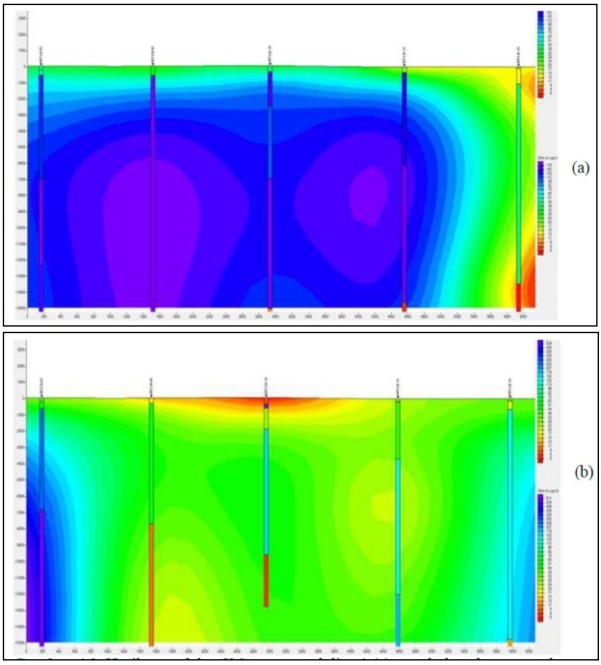


Gambar 2. 20 Model inversi NLCG MT 2-D (Darmawan, 2018)

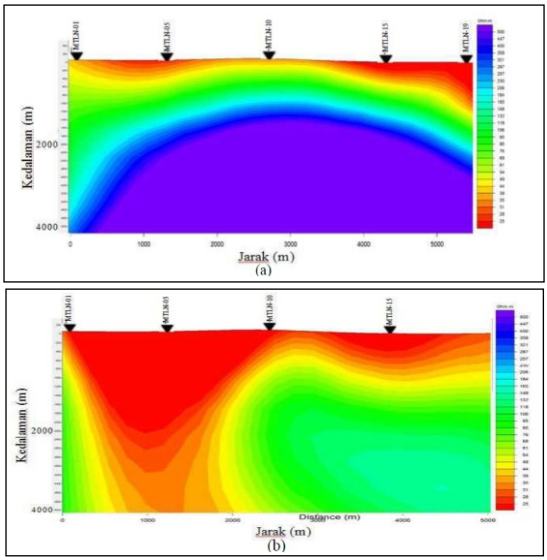
Untuk menghasilkan pemodelan yang baik, Darmawan melakukan smoothing curve, mesh parameter, model awal, dan parameter inversi. Hasil interpretasi menunjukan zona konduktif pada kedalaman ~500 m dengan nilai resistivitas 2-10 Ωm memiliki litologi berupa cretaceous dan tertiary sands dan clays. Zona yang lebih resistif dengan nilai resistivitas 30-100 Ωm pada kedalaman 500-2000 m memiliki litologi berupa cambrian dan adelaidean sandstone. Pada lapisan reisitivitas tinggi memiliki ambiguitas yang disebabkan adanya beberapa litologi batuan diantaranya batuan heatsource sehingga metode magnetotelurik kurang tepat untuk pemetaan zona heatsource.

Peneltian selanjutnya dilakukan oleh Nuraini (2017) dengan judul "Analisis Resistivitas Terhadap Pengaruh Mode Pada Pengolahan Data Magnetotelurik". Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan hasil pemodelan resistivitas bawah permukaan pada data magnetotelurik yang menggunakan mode TE dan mode TM serta mengidentifikasi sistem panas bumi dari hasil pengolahan data magnetotelurik. Penelitian ini menggunakan data sekunder survei magnetotelurik sebanyak 22 titik yang terdiri dari data *time series* hasil pengukuran, data *site* parameter, data kalibrasi sensor dan data kalibrasi alat. Selain itu, penelitian ini menggunakan data geologi sebagai data pendukung. Pada penelitian ini terdapat hasil berupa; Pengaruh mode pengukuran dalam pemodelan data dapat mempengaruhi nilai resistivitas yang dihasilkan baik dalam pemodelan 1-D maupun model 2-D. Data dengan mode TE (*transverse electric*) memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan nilai resistivitas dibawah permukaan secara lateral, sedangkan untuk data dengan mode TM (*transverse magnetic*) memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan nilai resistivitas dibawah permukaan secara vertikal. Sistem panasbumi yang teridentifikasi dalam penelitian ini dapat dijelaskan berdasarkan nilai resistivitas pada model 2-D yang menunjukkan adanya batuan penudung, *reservoir*, dan sumber panas. Lapisan penudung (*cap rock*) terdapat pada zona nilai resistivitas < 50 Ωm, lapisan *reservoir* terdapat pada zona resistivitas antara

50-200 oh.m, dan sumber panas (*heat source*) terdapat pada zona resistivitas > 200 Ωm. Berdasarkan data geologi lapisan penudung (*cap rock*) berasal dari alterasi batuan metamorf dan batuan sedimen (alterasi lempung). *Reservoir* terbentuk pada batuan metamorf dengan jenis filit dan batuan sedimen dengan jenis batupasir dan batu gamping. Sumber panasnya berasal dari kerak benua yang mengalami deformasi (*shearing*).

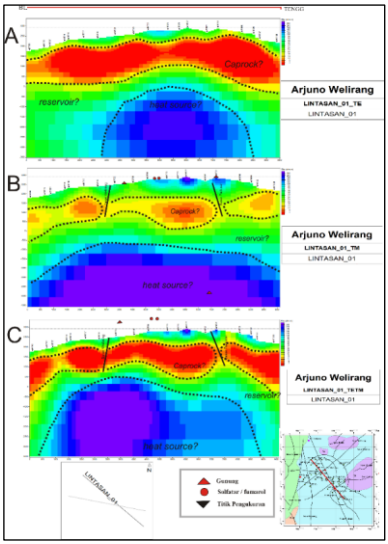


Gambar 2. 21 Hasil pemodelan X-section untuk line 1 (a). data dengan mode TE, (b) data dengan mode TM (Nuraini, 2017)

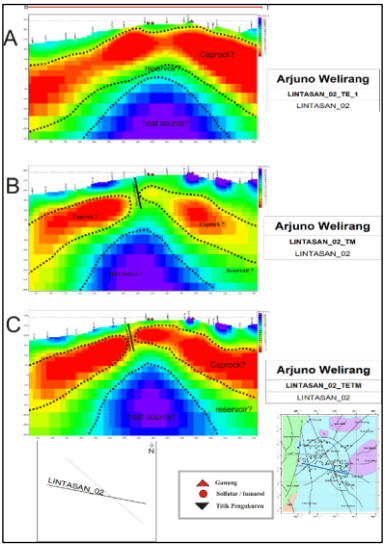


Gambar 2. 22 Hasil pemodelan 2-D data magnetotelurik (a) data dengan mode TE, (b) data dengan mode TM (Nuraini, 2017)

Pada tahun 2019 penelitian menggunakan metode magnetotelurik juga dilakukan oleh Luckytasari. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan 30 titik pengukuran magnetotellurik di daerah manifestasi panas bumi Arjuno Welirang yang memiliki tipe sistem panas bumi vulkanik. Pada penelitiannya Luckytasari berfokus pada bahasan sensitivitas dari mode TE, mode TM, dan mode TE-TM serta identifikasi sistem panas bumi daerah penelitian. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa mode TE memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas rendah (konduktif) secara lateral, mode TM memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas tinggi secara vertikal dan mode TE-TM memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan kontras nilai resistivitas secara lateral mapupun secara vertikal.



Gambar 2. 23 Interpretasi pemodelan inversi 2-D lintasan 1 (a) mode TE (b) mode TM dan (c) mode TE-TM (Luckytasari, 2019)



Gambar 2. 24 Interpretasi pemodelan inversi 2-D lintasan 2 (a) mode TE (b) mode TM dan (c) mode TE-TM (Luckytasari, 2019)

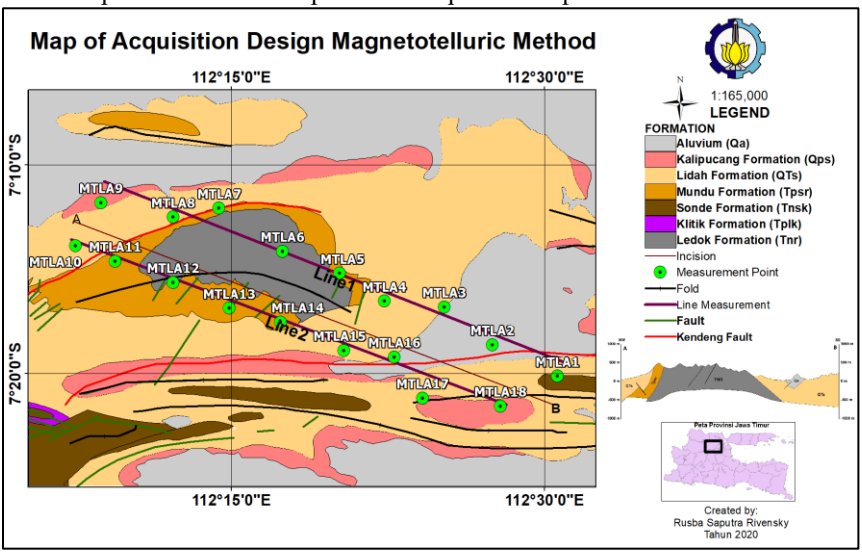
Hasil inversi dengan mode TE tidak menunjukkan adanya struktur pada daerah penelitian, sedangkan hasil inversi dengan mode TM dan dengan mode TE-TM menunjukkan adanya struktur yang diperkirakan berupa sesar. Sistem panas bumi yang teridentifikasi berada pada Formasi Gunung Api Arjuno – Welirang (Qvaw). Lapisan batuan penudung (*cap rock*) dengan nilai resistivitas 7 – 12 Ωm setebal 2000 m yang diperkirakan berasal dari Lava Muda Produk Welirang (Qlw) dan Lava Arjuno (Qlar). Lapisan *reservoir* dengan nilai resistivitas 13 – 65 Ωm setebal 500 m yang diperkirakan sebagai Aliran Piroklastik Arjuno Welirang (Qapaw). Lapisan *heat source* dengan nilai resistivitas 70 – 300 Ωm setebal 3000 m yang diperkirakan berasal dari Lava Pra Arjuno Welirang (Qlaw). Kontras resistivitas pada resistivitas rendah yang diduga sebagai Sesar Welirang dan Sesar Padusan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

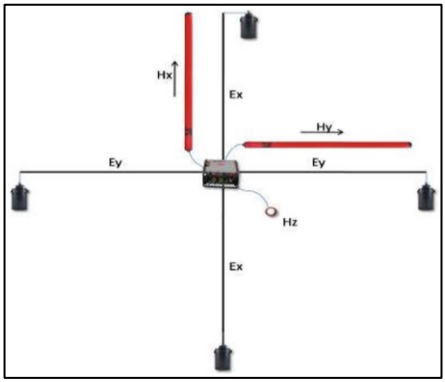
3.1. Akuisisi Data Magnetotelurik

Adapun desain akuisisi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Desain Pengukuran Metode Magnetotelurik

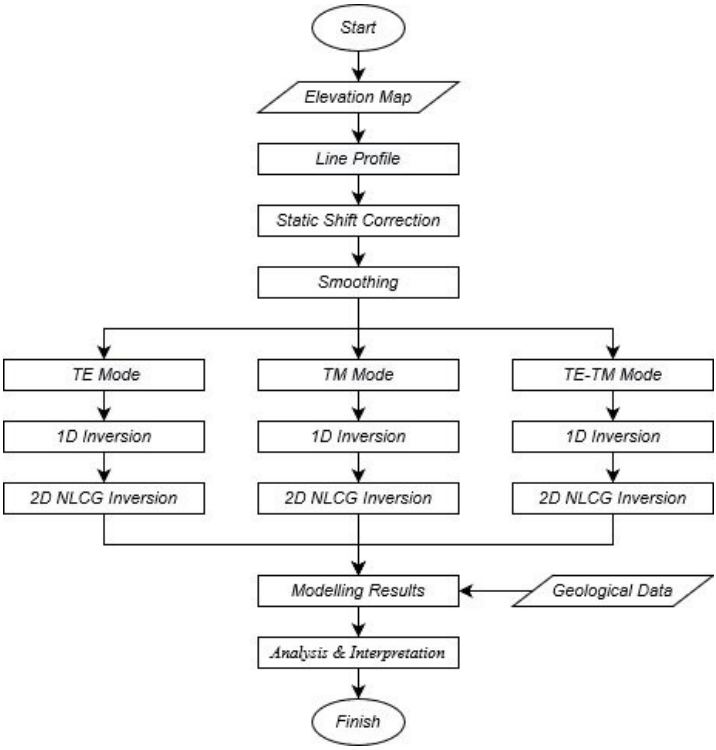
Data magnetotelurik yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 18 data magnetotelurik yang terbagi menjadi 2 lintasan dengan arah NW-SE yang meliputi daerah: Lamongan, Gresik, dan Mojokerto (Gambar 3.1). Adapun koordinat data magnetotelurik dapat dilihat pada tabel lampiran. Data yang diukur adalah medan magnet dalam arah x, y, z atau Bx, By, dan Bz. Sedangkan medan listrik diukur pada arah x dan y atau Ex dan Ey. Secara default, arah x, y, dan z adalah arah timur-barat, utara selatan, dan arah atas. Peralatan akuisisi MT terdiri dari 3 bagian, yaitu *main unit, coil* dan *porous pot*. Adapun susunan *main unit, coil* dan *porous pot* dapat dilihat pada gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3. 2 Susunan Alat Metoda Magnetotelurik

3.2. Diagram Alir Penelitian

Proses pengolahan data magnetotelurik hingga interpretasi dapat terdapat pada diagram alir dibawah ini (gambar 3.3). Pengolahan data pada penelitian ini pengolahan dimulai dari data berformat .EDI.



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian

Alur dari penelitian ini dimulai dari *import* data magnetotelurik dengan format (*.EDI) kemudian menampilkan peta elevasi untuk membuat lintasan pengukuran dan titik yang akan digunakan, setelah itu dilakukan koreksi *static shift* menggunakan data TDEM yang dilanjutkan dengan *smoothing* data tahap lanjut. Data yang telah dilakukan *smoothing* kemudian dilakukan inversi 1-D untuk mode TE, TM, dan TE-TM yang selanjutnya ditampilkan model *cross section* dari lintasan tersebut, selanjutnya dilakukan pemodelan inversi 2-D dengan mode TE, TM dan TE-TM. Adapun penjelasan langkah prosedur dijelaskan pada bagian-bagian berikut.

3.3. Tahapan Penelitian

3.3.1. Studi Literatur

Studi literatur mencakup studi geologi dan geofisika. Studi geologi bertujuan untuk memahami kondisi geologi regional, satuan batuan, dan jenis

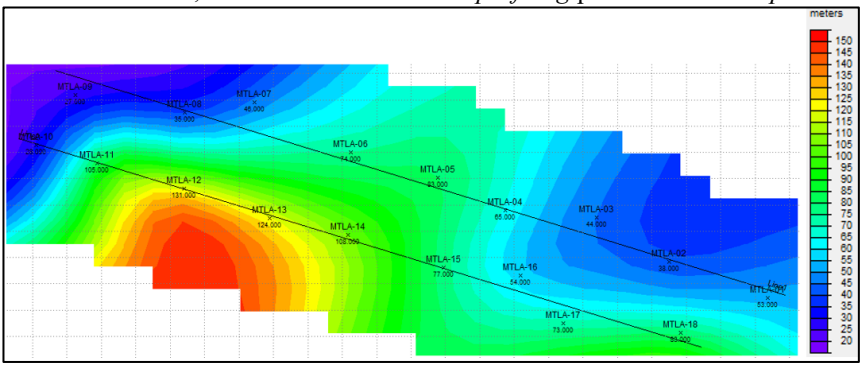
batuan di daerah penelitian, sedangkan studi geofisika terkait metode magnetotelurik.

3.3.2. Persiapan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data hasil pengukuran metode MT. Data hasil QC sekaligus editting kurva atau seleksi *crosspower* memiliki format *.*edi* sehingga dapat diolah menggunakan *software* selanjutnya.

3.3.3. *Line Profilling*

Data magnetotelurik dengan format (*.EDI) yang telah di *import* ke *project.* Data hasil pengukuran ini selanjutnya dilakukan pembuatan *mapping* dengan *plotting* koordinat dan elevasi, *plotting* koordinat yang dilakukan menggunakan koordinat UTM dengan *Hemisphere South* dan menggunakan datum WGS 1984, kemudian dilakukan *line profiling* pada *elevation map.*



Gambar 3. 4 *Elevation Map*

Dalam penelitian ini, *Line profiling* dilakukan untuk membuat lintasan dari data hasil pengukuran yang selanjutnya lintasan tersebut akan dilakukan pemodelan, *line profiling* yang dibuat terdiri dari 18 data pengukuran MT yang dibagi kedalam 2 line (Gambar 4.1).

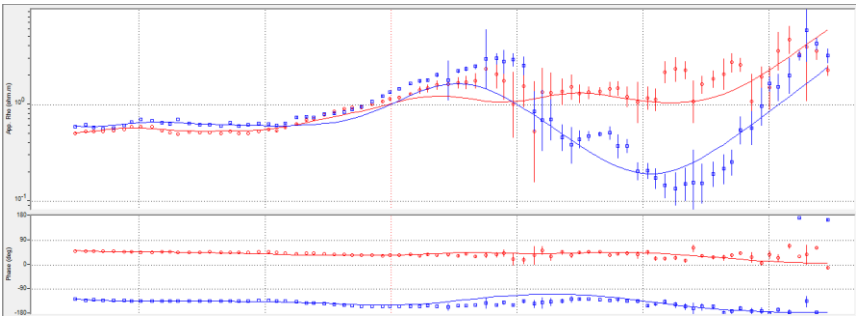
3.3.4. Koreksi *Static Shift* dan *Smoothing*

Data hasil pengukuran lapangan akan merekam fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang menghasilkan dua informasi yang membentuk kurva Transverse Electric (TE) dan kurva Transverse Magnetic (TM) yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi. Pengukuran magnetotelurik yang ideal akan menghasilkan kurva AppRho pada masing-masing mode akan berhimpit, namun struktur yang ada di bawah permukaan bumi sangat kompleks, sehingga kurva AppRho TE dan kurva AppRho TM ini mengalami pergeseran dan tidak menampilkan nilai AppRho yang sebenarnya. Adanya pergeseran antara kurva AppRho TE dan kurva

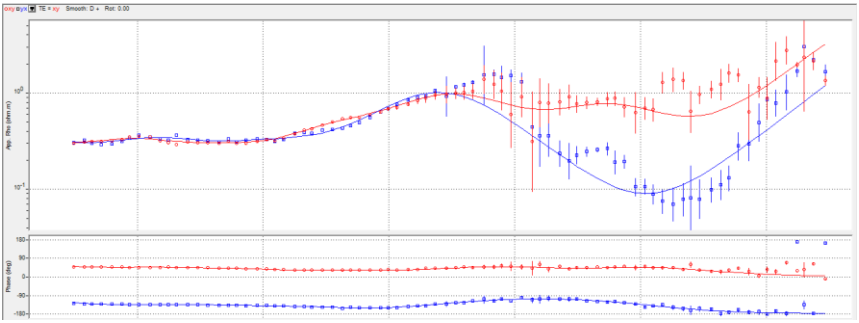
AppRho TM dapat disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah: adanya efek yang ditimbulkan topografi, dan adanya efek heterogenitas dekat permukaan, dan adanya kontak vertical (struktur). Data hasil pengukuran tidak menunjukkan kondisi yang ideal yang ditunjukkan dengan kurva AppRho TE dan kurva AppRho TM yang tidak saling berhimpitan, karena adanya pergeseran kurva AppRho TE dan kurva AppRho TM sehingga diperlukan editting dan koreksi static shift.

Pada proses editing dilakukan perlakuan smoothing menggunakan smoothing D+ untuk semua data observasi. Smoothing D+ merupakan smoothing data berdasarkan pola kurva AppRho terhadap pola kurva fase dengan parameter error bar sebagai dasar proses smoothing. Proses ini juga melibatkan parameter error bar sebagai dasar dalam proses penghalusan pola kurva, semakin besar error barnya maka hasil smoothingnya akan menghasilkan kurva smoothing yang semakin menjauhi dari pola kurva data observasi. Sebab pada dasarnya, D+ dapat menduga bentuk kurva tersebut dengan mempertimbangkan efek error barnya pada kurva rho apparent dan derajat fase. Pada proses editing ini pula dilakukan perlakuan masking dan shifting pada titik yang belum sesuai dengan trend kurva atau dilakukan masking terhadap titik yang dianggap sebagai noise. Perlakuan shifting dilakukan dengan menggeser titik-titik yang keluar dari trend data, sedangkan masking dilakukan untuk menutup atau mematikan titik yang dianggap sebagai noise. Setelah dilakukan tahap editing selanjutnya dilakukan koreksi static shift.

Koreksi *static shift* yang dilakukan dengan menggesar kurva AppRho TE dan kurva AppRho TM ke titik nilai AppRho yang sebenarnya agar kedua kurva tersebut berhimpitan, pergeseran ini dilakukan dengan cara memperkirakan nilai median dari polarisasi resistivitas semu pada titik pengukuran. Dalam penelitian ini, koreksi *static shift* dilakukan dengan menggeser kurva TE dan TM pada titik yang memiliki frekuensi tinggi (323 Hz) yang diduga mengalami pergeseran akibat adanya heterogenitas dekat permukaan, sehingga dengan dilakukan koreksi *static shift* dapat membuat kurva TE dan TM berhimpitan. Pengolahan koreksi *static shift* dilakukan pada masing-masing titik pengukuran, berikut merupakan salah satu contoh titik pengukuran magnetotelurik sebelum dilakukan koreksi *static shift* dan sesudah dilakukan koreksi *static shift* (gambar 3.5 dan 3.6).



Gambar 3. 5 Data MTLA-1 sebelum dilakukan koreksi *static shift*



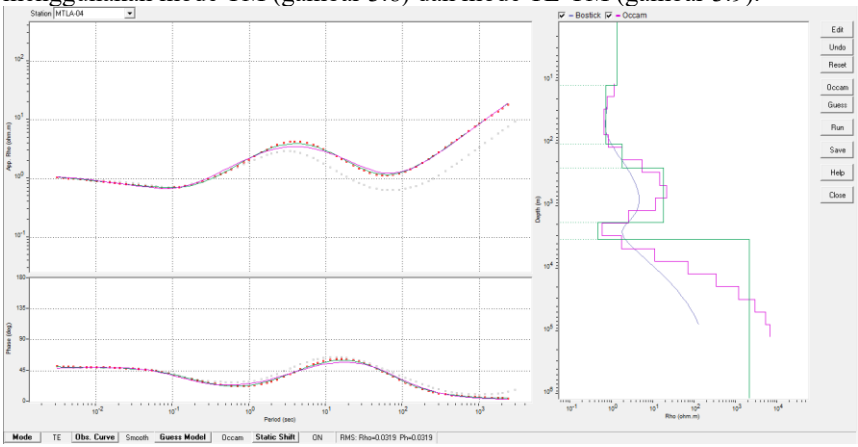
Gambar 3. 6 Data MTLA-1 setelah dilakukan koreksi *static shift*

Pada kurva resistivitas terhadap phase (gambar 3.5) sebelum dilakukan koreksi *static shift* dapat diketahui bahwa pada frekuensi 323 Hz kurva TE (merah) bernilai sebesar 0.59 Ωm dan kurva TM (biru) bernilai 0,51 Ωm kemudian dilakukan koreksi *static shift* sehingga kedua kurva berhimpitan (gambar 3.6). Berdasarkan nilai rho data MTLA-1 pada frekuensi yang sama (323 Hz) sebesar 0.57 Ωm, sehingga kurva TE dan kurva TM digeser sesuai dengan nilai rho sebenarnya. Pengolahan koreksi *static shift* lintasan 1 dan lintasan 2 terdapat pada lampiran.

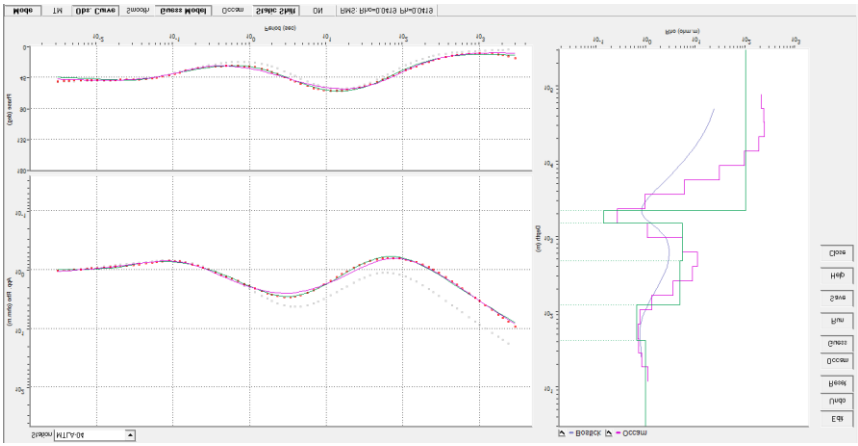
3.3.5. Pemodelan Inversi 1-D

Pemodelan 1D data magnetotelurik merupakan pemodelan yang dibuat berdasarkan hasil pencocokan kurva *editing* atau *smoothing* dengan memperhatikan fungsi dari nilai kedalaman dan nilai resistivitas. Pemodelan inversi 1D magnetotelurik dapat dilakukan dengan beberapa dengan beberapa inversi agar memperoleh parameter resistivitas dari data, salah satu inversi yang biasa digunakan adalah inversi Occam. Menurut Wijaya (2016), inversi Occam merupakan metode inversi yang baik karena metode Occam melakukan pendekatan numerik (pendekatan linier) terhadap model sintetik dengan evaluasi

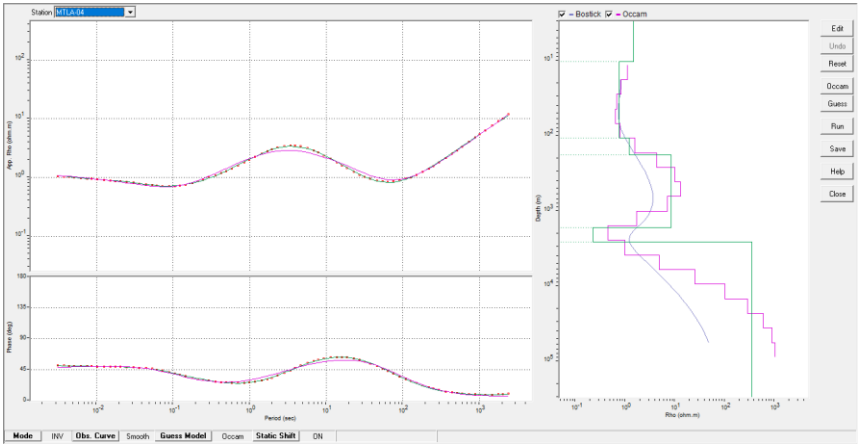
model berupa misfit, faktor *smoothing*, partubrasi model, dan rms error. Solusi model dapat ditemukan dengan cepat dan menghasilkan model yang *smooth*, sehingga pemodelan 1D dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan inversi Occam. Pemodelan 1D data magnetotelurik pula dapat dilakukan dengan menggunakan tiga analisis mode, yaitu mode TE, mode TM, dan mode TE-TM (invariant). Penelitian ini dilakukan pemodelan dengan menggunakan kurva *smoothing* TE, TM, dan Invariant. Berikut adalah hasil pemodelan inversi 1D salah satu titik (MTLA 4) pada lintasan 1 dengan menggunakan mode TE (gambar 3.7), selain itu dilakukan pula pemodelan inversi 1D dengan menggunakan mode TM (gambar 3.8) dan mode TE-TM (gambar 3.9).



Gambar 3. 7 Pemodelan 1D dengan Menggunakan Mode TE

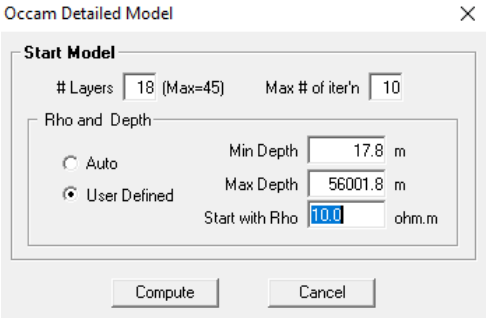


Gambar 3. 8 Pemodelan 1D dengan Menggunakan Mode TM



Gambar 3. 9 Pemodelan 1D dengan Menggunakan Mode Invariant (TE-TM)

Pada inversi 1D terdapat dua kurva yang terdiri dari kurva kalkulasi dan kurva observasi, dimana kurva sounding ini berisi informasi nilai resistivitas terhadap kedalaman. Kurva kalkulasi yang dihasilkan kemudian dilakukan pencocokan dengan cara menggeser kurva kalkulasi agar mendekati *trend* kurva observasi, sehingga kedua kurva saling berhimpitan dan menghasilkan nilai *error* yang terkecil. Adapun *setting parameter* yang digunakan dalam pemodelan 1D ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 10 *Setting Parameter 1D*

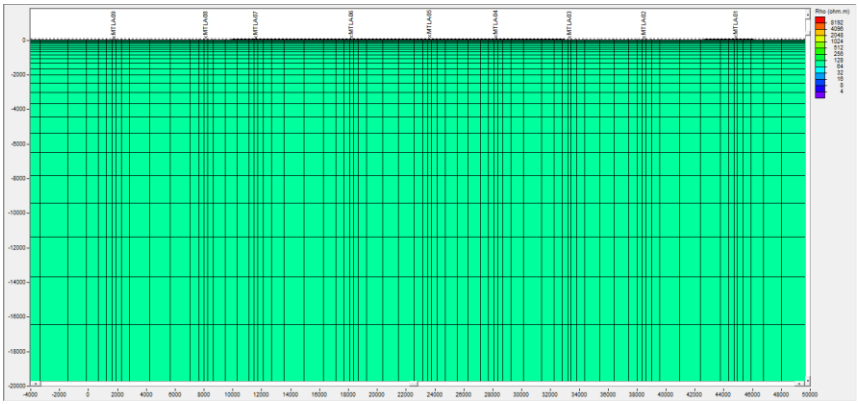
Hasil pengolahan 1-D diatas dapat diamati bahwa terdapatnya perbedaan antara pemodelan yang dilakukan dengan mode TE, TM. Dan Invariant, perbedaan ini dapat diamati secara kuantitatif dengan melihat nilai dari RMS *error*. RMS *error* ini didapatkan berdasarkan hasil pencocokkan kurva kalkulasi (kurva kanan) dengan kurva observasi (kurva kiri), sehingga didapatkan bentuk kurva yang paling ideal dengan nilai *error* terkecil. Pada hasil pemodelan titik MTLA-4 diatas, dapat diamati bahwa pemodelan pada mode TE didapatkan nilai RMS

error sebesar 0.319, pada mode TM nilai RMS *error* sebesar 0.0419, sedangkan pada mode *Invariant* nilai RMS *error* 0.017.

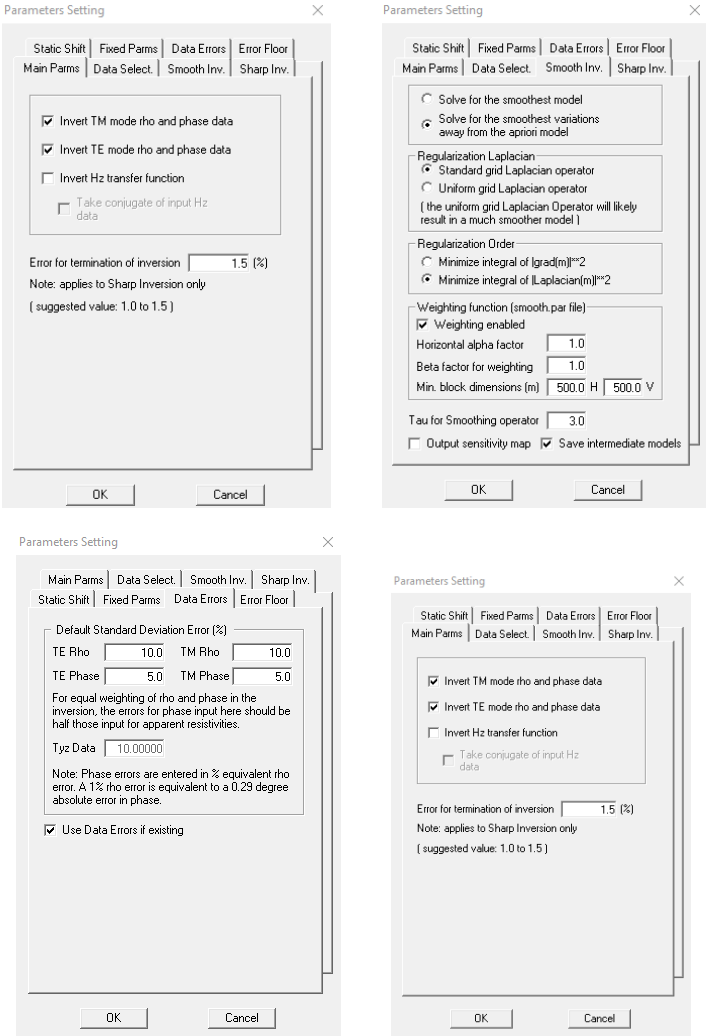
3.3.6. Pemodelan 2D *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG)

Pemodelan 2D dilakukan dengan menggunakan inversi NLCG yang dianalisis menggunakan perbandingan tiga mode, yaitu: mode TE, mode TM, dan mode *Invariant* (TE-TM). Algoritma inversi NLCG merupakan algoritma yang dapat meminimalisasi fungsi objektif dari misfit data untuk memperoleh hasil model yang optimal dan stabil menggunakan faktor regularisasi dan faktor pengali Lagrange. Pemodelan 2D NLCG diawali dengan membuat *initial model* dan menentukan parameter inversi yang akan digunakan. Mesh merupakan salah satu *typical* dari salah satu elemen 2D yang harus ada. *Mesh* ini merupakan jarring-jaring yang harus dimiliki setidaknya minimal satu kolom untuk setiap stasiun dari profil, setiap sel *mesh* mendefinisikan nilai dari resistivitas.

Penelitian ini dilakukan dengan membuat parameter *mesh* sebagai model awal dari *forward modelling* dengan mengasumsikan bumi memiliki lapisan homogen yang memiliki nilai tahanan jenis sebesar 100 ohm.m. Parameter input tau sebesar 3, dimana jika semakin besar nilai tau yang digunakan maka model yang dihasilkan akan semakin *smooth* namun memiliki akurasi kecocokan dengan data yang lebih rendah. Kemudian mengatur nilai decade sebesar 4, nilai frekuensi decade berjumlah 5 (100Hz, 10 Hz, 1 Hz, 0.1 Hz, 0.01 Hz). Input nilai parameter yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Luckytasari (2019) yang melakukan penelitian magnetotelurik di daerah panasbumi Arjuno Welirang dan hasilnya dapat diidentifikasi adanya keberadaan struktur pada penelitian tersebut.



Gambar 3. 11 *Forward Modelling*



Gambar 3. 12 Parameter Inversi 2-D

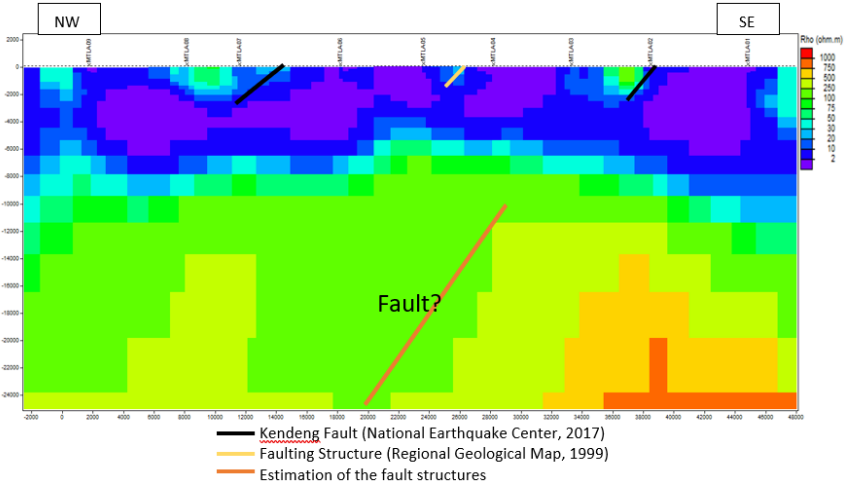
BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Interpretasi

Penelitian magnetotelurik ini dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi dan memetakan struktur patahan dengan menganalisis perbandingan pemodelan nilai resistivitas bawah permukaan data magnetotelurik menggunakan mode TE (*Transverse Electric*), mode TM (*Transverse Magnetic*) dan mode TE-TM. Mode TE merupakan pengukuran magnetotelurik dengan komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama. Adapun mode TM merupakan mode dalam pengukuran magnetotelurik dengan komponen medan magnet sejajar dengan arah struktur utamanya. Tahap interpretasi dilakukan dengan cara mengintegrasikan hasil pemodelan magnetotelurik dengan data pemetaan struktur patahan aktif yang diterbitkan oleh Pusat Gempa Nasional (PusGeN) (2017) dan peta geologi regional (Gafoer dan Ratman, 1999). Berdasarkan data PusGen (2017) terdapat dua struktur patahan aktif pada desain akuisisi pengukuran, yaitu Patahan Kedung Waru dan Patahan Blumbang. Jika diamati berdasarkan geologi regional, desain akuisisi pengukuran ini terdapat struktur lipatan dan patahan minor. Pada penampang resistivitas 2D, interpretasi adanya patahan yang merujuk pada data PusGeN (2017) ditandai oleh garis warna hitam, sedangkan interpretasi adanya patahan yang merujuk peta geologi regional (1999) ditandai oleh garis berwarna krem, interpretasi dugaan adanya struktur ditandai oleh garis berwarna oranye. Penelitian ini dilakukan terdiri dari 2 lintasan dengan arah NW-SE. Perlu diingat bahwa metoda inversi 1D merupakan metoda yang bersifat aproksimatif sehingga hanya dapat dilakukan sebagai usaha pemodelan dan interpretasi pada tahap pendahuluan, oleh karena itu interpretasi berfokus pada pemodelan 2D dengan menggunakan inversi *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG).

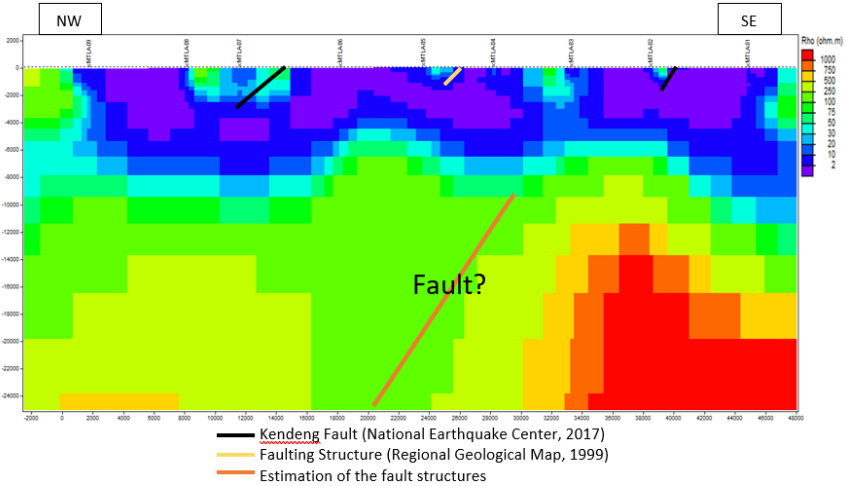
4.1.1 Interpretasi 1D *Line 1*

Lintasan 1 pengkuran magnetotelurik membentang dengan arah NW-SE (barat laut-tenggara) yang terdiri dari data *sounding* MTLA 01, MTLA 02, MTLA 03, MTLA 04, MTLA 05, MTLA 06, MTLA 07, MTLA 08, MTLA 09. Pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini dengan menganalisis 3 mode, yaitu: mode TE, mode TM, dan mode *Invariant (*TE-TM).



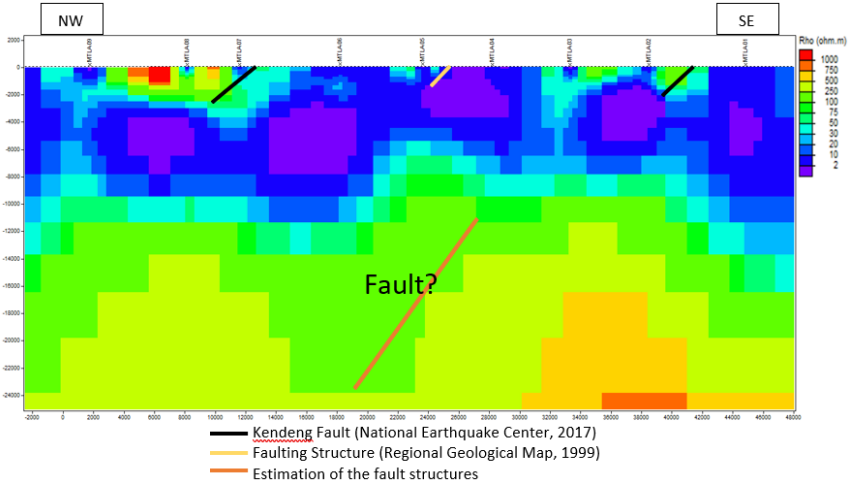
Gambar 4. 1 Pemodelan 2-D dengan Mode TE

Hasil pemodelan 2D dengan menggunakan mode TE (gambar 4.1) diatas, dilakukan interpretasi terdapatnya anomaly resistivitas dengan *range* nilai 30-250 ohm.m, anomali resistivitas ini diinterpretasikan dengan adanya Sesar Kendeng Waru yang berada dibawah titik MTLA 02, dimana patahan ini memiliki kedalaman sekitar ±2000 m. Adanya anomali resistivitas dengan range 30-250 ohm.m yang berada didekat titik MTLA 07 yang melebar hingga mendekati titik MTLA 08 diinterpretasikan dengan adanya Patahan Kendeng Blumbang dengan kedalaman ±2400 m. Diantara titik MTLA 04 dan MTLA 05 diidentifikasi adanya patahan minor dengan kedalaman ±1200 m. Pada kedalaman >10000 m diidentifikasi terdapatnya anomali resistivitas yang diduga merupakan patahan, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki *trend* arah NE-SW.



Gambar 4. 2 Pemodelan 2-D dengan Mode TM

Hasil pemodelan 2D dengan menggunakan mode TM (gambar 4.2) diatas, dilakukan interpretasi terdapatnya anomaly resistivitas dengan *range* nilai 30-250 ohm.m, anomali resistivitas ini diinterpretasikan dengan adanya Sesar Kendeng Waru yang berada didekat titik MTLA 02, dimana patahan ini memiliki kedalaman sekitar ±1600 m. Adanya anomali resistivitas dengan range 30-250 ohm.m yang berada didekat titik MTLA 07 yang melebar hingga mendekati titik MTLA 08 diinterpretasikan dengan adanya Patahan Kendeng Blumbang dengan kedalaman ±2200 m. Diantara titik MTLA 04 dan MTLA 05 diidentifikasi adanya patahan minor dengan kedalaman ±1000 m. Pada kedalaman >10000 m diidentifikasi terdapatnya anomali resistivitas yang diduga merupakan patahan, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki *trend* arah NE-SW.

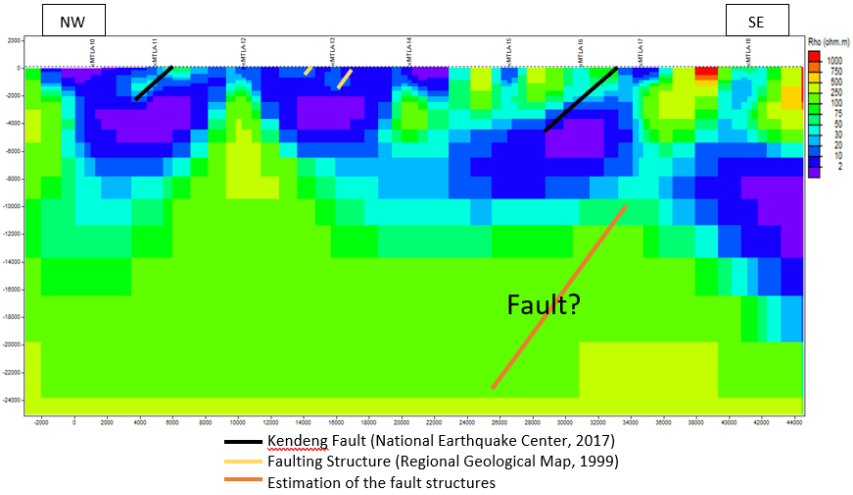


Gambar 4. 3 Pemodelan 2-D dengan Mode TE-TM

Hasil pemodelan 2D dengan menggunakan mode TE-TM (gambar 4.3) diatas, dilakukan interpretasi terdapatnya anomaly resistivitas dengan *range* nilai 30-250 ohm.m, anomali resistivitas ini diinterpretasikan dengan adanya Sesar Kendeng Waru yang berada diantara titik pengukuran MTLA 01 dan MTLA 02, dimana patahan ini memiliki kedalaman sekitar ±2000 m. Adanya anomali resistivitas dengan range 30-750 ohm.m yang berada didekat titik MTLA 07 yang melebar hingga mendekati titik MTLA 09 diinterpretasikan sebagai dengan adanya Patahan Kendeng Blumbang dengan kedalaman ±2400 m. Diantara titik MTLA 04 dan MTLA 05 diidentifikasi adanya patahan minor dengan kedalaman ≤1000 m. Pada kedalaman >10000 m diidentifikasi terdapatnya anomali resistivitas yang diduga merupakan patahan, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki *trend* arah NE-SW.

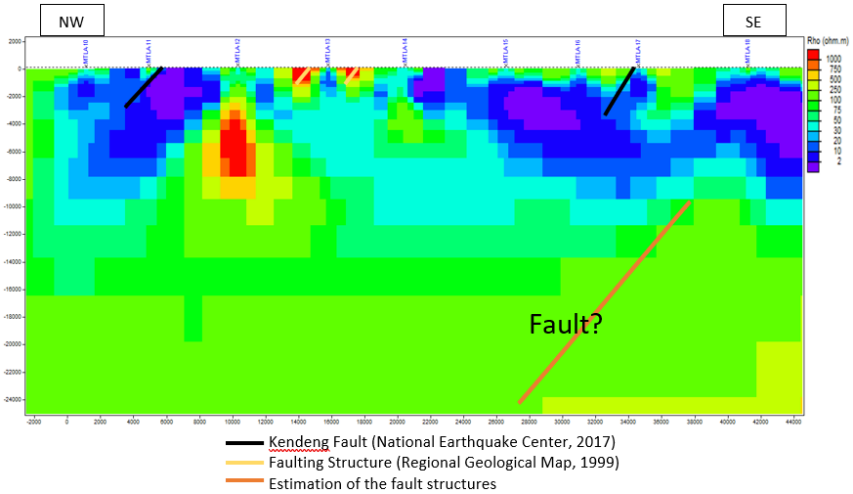
4.1.2 Interpretasi 2D *Line* 2

Lintasan 2 pengkuran magnetotelurik membentang dengan arah NW-SE (barat laut-tenggara) yang terdiri dari data *sounding* MTLA 10, MTLA 11, MTLA 12, MTLA 13, MTLA 14, MTLA 15, MTLA 16, MTLA 17, dan MTLA 18. Pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini dengan menganalisis 3 mode, yaitu: mode TE, mode TM, dan mode *Invariant (*TE-TM).



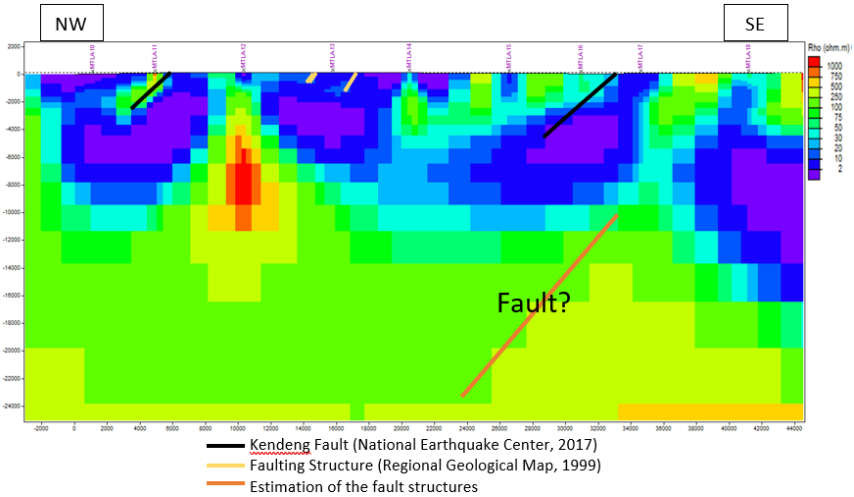
Gambar 4. 4 Pemodelan 2-D dengan Mode TE

Pemodelan 2D menggunakan mode TE (gambar 4.4) menunjukkan terdapat beberapa anomali resistivitas. Pada daerah disekitar titik MTLA 11 terdapat anomali resistivitas dengan range nilai resistivitas 30-100 ohm.m yang diinterpretasikan dengan keberadaan Sesar Kendeng Blumbang dengan kedalaman ±2000 m. Pada daerah di sekitar titik MTLA 16 dan MTLA 17 ditemukan adanya anomali resistivitas dengan *range* 30-250 ohm.m yang diinterpretasikan dengan keberadaan Sesar Kendeng Waru dengan kedalaman hingga ±4400 m. Pada daerah yang berada dibawah titik MTLA 12 terdapatnya anomali resistivitas dengan range 75-250 ohm.m yang memanjang dari bawah hingga tersingkap keatas yang diinterpretasikan dengan adanya lipatan antiklin. Pada daerah disekitar titik MTLA 13 terdapat ada dua struktur patahan minor, namun keberadaan sesar minor ini tidak teridentifikasi dengan baik karena tidak terlihat adanya kontras nilai resistivitas yang signifikan seperti pada penampang model mode TM. Selain itu, berdasarkan geologi regional dapat diamati adanya lipatan antiklin diantara titik MTLA 17 dan MTLA 18 yang ditandai dengan warna hijau-merah (75-1000 ohm.m). Pada kedalaman >10000 m diidentifikasi terdapatnya anomali resistivitas yang diduga merupakan patahan, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki *trend* arah NE-SW.



Gambar 4. 5 Pemodelan 2-D dengan Mode TM

Pemodelan 2D menggunakan mode TM (gambar 4.5) menunjukkan terdapat beberapa anomali resistivitas. Pada daerah disekitar titik MTLA 11 terdapat anomali resistivitas dengan range nilai resistivitas 30-100 ohm.m yang diinterpretasikan dengan keberadaan Sesar Kendeng Blumbang dengan kedalaman ±2400 m. Pada daerah di sekitar titik MTLA 16 dan MTLA 17 ditemukan adanya anomali resistivitas dengan *range* 30-250 ohm.m yang diinterpretasikan dengan keberadaan Sesar Kendeng Waru dengan kedalaman hingga ±3900 m. Pada daerah yang berada dibawah titik MTLA 12 terdapatnya anomali resistivitas dengan range 75-1000 ohm.m yang memanjang dari bawah hingga tersingkap keatas yang diinterpretasikan dengan adanya lipatan antiklin. Pada daerah disekitar titik MTLA 13 terdapat ada dua struktur patahan minor yang ditandai dengan anomali resistivitas dengan range 250-1000 ohm.m, patahan minor ini terlihat sangat jelas pada penampang mode TM. Selain itu, terdapat pula adanya struktur lipatan antiklin diantara titik MTLA 17 dan MTLA 18 yang ditandai dengan warna hijau-merah (75-1000 ohm.m). Pada kedalaman >10000 m diidentifikasi terdapatnya anomali resistivitas yang diduga merupakan patahan, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki *trend* arah NE-SW.



Gambar 4. 6 Pemodelan 2-D dengan Mode TE-TM

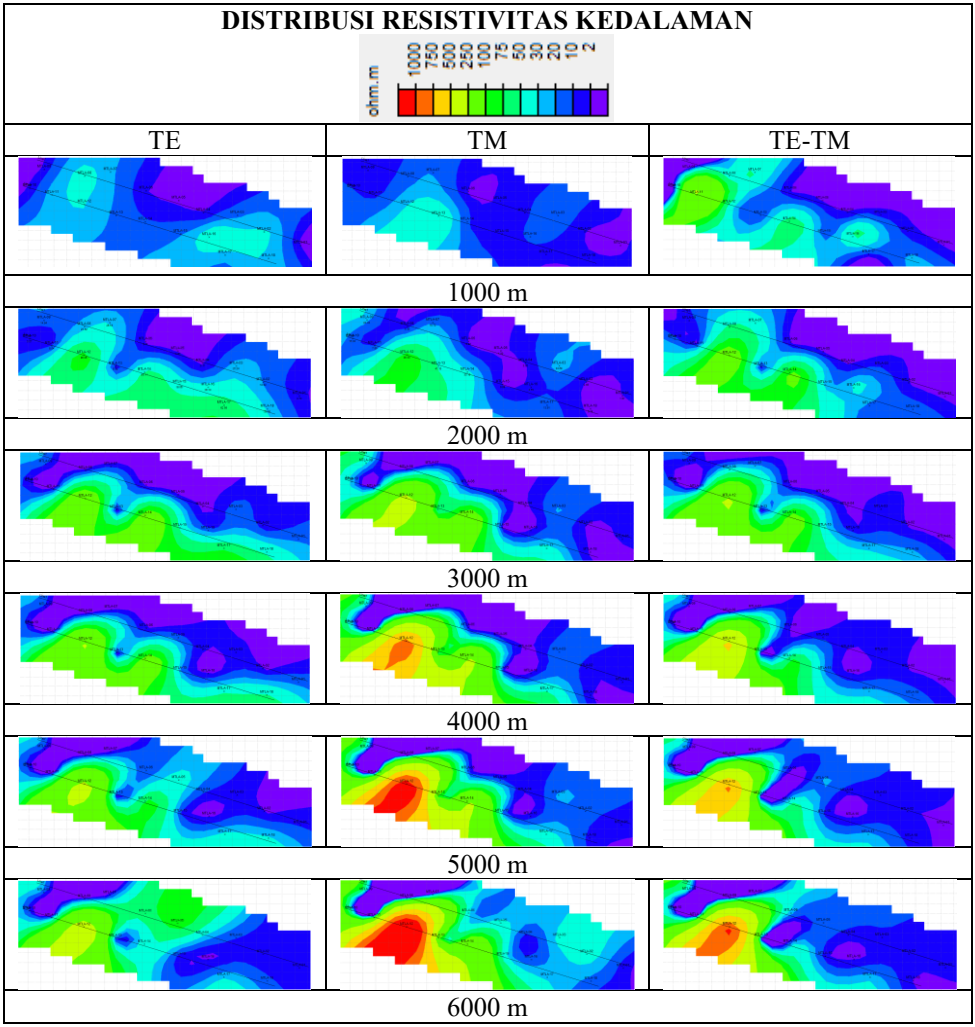
Pemodelan 2D menggunakan mode TE-TM (gambar 4.6) menunjukkan terdapat beberapa anomali resistivitas. Pada daerah disekitar titik MTLA 11 terdapat anomali resistivitas dengan range nilai resistivitas 30-250 ohm.m yang diinterpretasikan dengan keberadaan Sesar Kendeng Blumbang dengan kedalaman ±2600 m. Pada daerah di sekitar titik MTLA 16 dan MTLA 17 ditemukan adanya anomali resistivitas dengan *range* 30-100 ohm.m yang diinterpretasikan dengan keberadaan Sesar Kendeng Waru dengan kedalaman hingga ±4400 m. Pada daerah yang berada dibawah titik MTLA 12 terdapatnya anomali resistivitas dengan range 75-1000 ohm.m yang memanjang dari bawah hingga tersingkap keatas yang diinterpretasikan dengan adanya struktur lipatan antiklin. Pada daerah disekitar titik MTLA 13 terdapat ada dua struktur patahan minor, namun keberadaan sesar minor ini tidak teridentifikasi dengan baik karena tidak terlihat adanya kontras nilai resistivitas yang signifikan seperti pada penampang model mode TM. Selain itu, terdapat pula adanya struktur lipatan antiklin diantara titik MTLA 17 dan MTLA 18, yang ditandai dengan warna hijau-merah (75-500 ohm.m). Pada kedalaman >10000 m diidentifikasi terdapatnya anomali resistivitas yang diduga merupakan patahan, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki *trend* arah NE-SW.

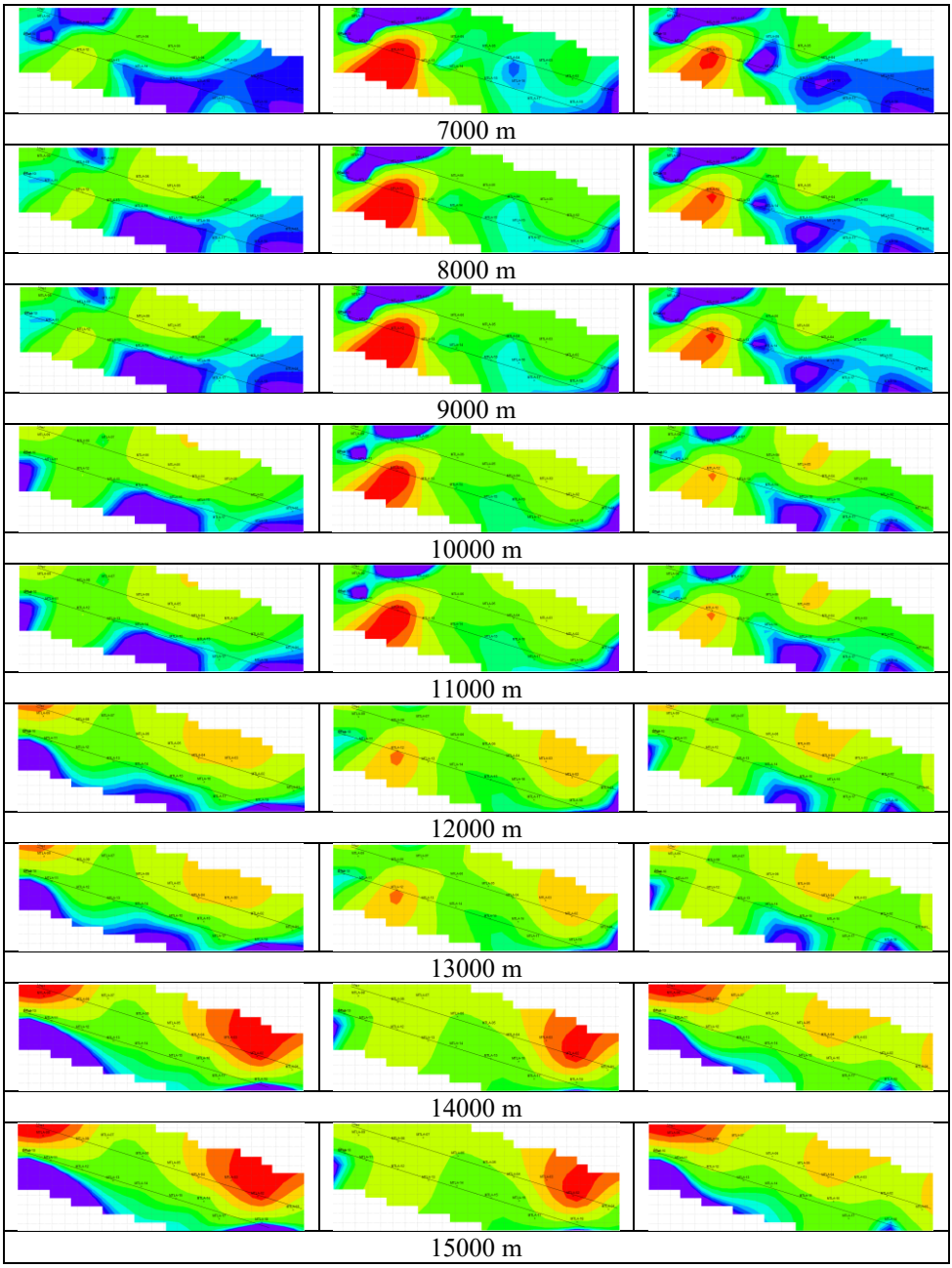
4.2 Distribusi Resistivitas Kedalaman

Distribusi resistivitas kedalaman ini akan dibuat dengan melakukan sayatan pada kedalaman tertentu dari pemodelan 2D dengan tujuan untuk membantu melakukan analisis kuantitatif persebaran nilai resistivitas dan untuk

melihat sensitivitas mode secara lateral. Dalam penelitian ini, peta sayatan kedalaman dibuat pada kedalaman 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, 5000 m, 6000 m, 7000 m, 8000 m, 9000 m, 10000 m, 11000 m, 12000 m, 13000 m, 14000 m, dan 15000 m. Peta ini dibuat dengan menganalisis tiga mode TE, mode TM, dan mode TE-TM (tabel 4.1)

Tabel 4. 1 Distribusi Resistivitas Kedalaman




7000 m
8000 m
9000 m
10000 m
11000 m
12000 m
13000 m
14000 m
15000 m

Pada kedalaman 1000 m, model mode TE terlihat adanya persebaran nilai zona konduktif (<2 ohm.m) yang lebih sedikit daripada mode TM, dan pada mode TE-TM terdapat persebaran nilai resistivitas medium (50-100 ohm.m) dan terdapatnya persebaran nilai zona konduktif yang baik. Pada kedalaman 2000 m, persebaran nilai resistivitas medium (50-100 ohm.m) pada penampang mode TM tidak terekam sebesar dan sebaik mode TE dan mode TE-TM. Pada kedalaman 3000 m, persebaran nilai resistivitas *relative* sama, namun pada daerah disekitar titik MTLA 13 terdapat persebaran nilai resistivitas rendah (± 10 ohm.m) yang dapat diamati pada mode TE dan mode TE-TM dan tidak ditemukan pada mode TM. Pada kedalaman 4000 m, mode TM ditemukan adanya persebaran nilai resistivitas tinggi (500-750 ohm.m) yang ditandai dengan warna *orange* namun persebaran resistivitas tinggi ini tidak ditemukan pada mode TE dan mode TE-TM. Persebaran nilai resitivitas tinggi disekitar titik MTLA 12 pada mode TM semakin membesar dan menguat yang ditandai dengan warna orange-merah (>750ohm.m) yang dapat diamati hingga kedalaman 11000 m dan mulai menghilang pada kedalaman 12000 m. Pada mode TE-TM terlihat mulai munculnya persebaran nilai resistivitas tinggi (>500 ohm.m) disekitar titik MTLA 12 pada kedalaman 5000 m dan mulai menghilang pada kedalaman 10000 m, walaupun persebaran nilai resistivitas tinggi ini tidak sebesar mode TM, sedangkan pada mode TE hanya ditemukan adanya persebaran nilai resistivitas medium (≤ 250 ohm.m) yang muncul disekitar titik MTLA 12 pada kedalaman 5000 m dan mulai menghilang pada kedalaman 10000 m.

Terdapatnya persebaran zona konduktif (≤ 10 ohm.m) pada bagian tengah disekitar titik MTLA 14, MTLA 15, dan MTLA 16 yang dapat diamati pada mode TE kedalaman 7000 m dan mulai menghilang pada kedalaman 12000 m. Persebaran zona konduktif ini juga dapat diamati pada mode TE-TM walaupun tidak sebesar pada mode TE namun tidak teramati pada mode TM. Pada kedalaman 12000 m, terlihat pada bagian barat laut atas adanya persebaran nilai resistivitas tinggi (250-750 ohm.m) yang dapat diamati pada mode TE dan mode TE-TM, namun persebaran nilai resistivitas tinggi ini tidak ditemukan pada mode TM. Persebaran nilai resistivitas tinggi ini kemudian berkembang dan menguat yang ditandai dengan warna orange-merah (≥500 – 1000 ohm.m) pada kedalaman 14000 m dan 15000 m yang dapat diamati menggunakan mode TE dan mode TE-TM, namun tidak teramati dengan mode TM. Pada kedalaman 14000 m dan 15000 m, dapat diamati adanya persebaran zona konduktif (< 10 ohm.m) pada bagian tengah hingga barat laut bawah yang dapat diamati menggunakan mode TE dan mode TE-TM, namun tidak teramati dengan mode TM.

Jika diamati pada persebaran nilai resistivitas secara lateral, dapat disimpulkan bahwa mode TE memiliki sensitivitas yang lebih baik daripada mode TM dalam memetakan distribusi nilai resistivitas rendah (konduktif) dan resistivitas tinggi secara lateral. Adapun mode TE-TM merupakan gabungan dari mode TE dan mode TM sehingga memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan distribusi resistivitas secara vertikal dan lateral.

4.3 Pembahasan

Berdasarkan peta geologi regional (1999), lintasan pengukuran ini melalui empat formasi yaitu: Endapan Aluvium, kemudian Formasi Lidah yang terdiri dari batulempung dengan sisipan batupasir dan batugamping yang kaya akan foraminifera, Formasi Mundu yang terdiri dari batuan napal dengan sisipan batulempung dan batugamping, dan terdiri dari Formasi Ledok yang terdiri dari perselingan kalkarenit, batupasir dan napal, dan batugamping (Gafoer dan Ratman, 1999). Keberadaan formasi-formasi ini yang ditandai dengan resistivitas rendah ($\leq$250 ohm.m) yang berada di dekat permukaaan dengan lithologi batuan yang *porous*. Pada penampang resistivitas 2D dapat dilakukan interpretasi bahwa warna ungu-biru ($\leq$30 ohm.m) diinterpretasikan dengan lapisan yang banyak mengandung batulempung, lanau, aluvium dan marl. Adapun warna hijau-kuning (30-250 ohm.m) yang berada di dekat permukaan yang diinterpretasikan dengan lapisan yang banyak mengandung batupasir dan batugamping. Selain itu, batuan-batuan yang terdapat pada formasi-formasi ini merupakan batuan sedimen, dimana terdapatnya batuan yang memiliki nilai resistivitas yang *overlapping* antara satu dengan lainnya, sehingga penentuan batas formasi batuan sulit untuk dilakukan. Penelitian menggunakan metode magnetotelurik memiliki resolusi yang tidak sebaik metode seismik dalam mendeliniasi perbedaan formasi, sehingga penelitian ini tidak dilakukan penentuan batas formasi dengan detail, namun penelitian ini berfokus terhadap adanya keberadaan patahan.

Interpretasi yang dilakukan dalam penelitian ini merujuk pada data PusGeN (2017) dan data geologi regional [1] [12]. Namun, pada penampang model resistivitas 2D *line* 1 diatas, dapat diamati disekitaran titik MTLA 04, MTLA 05, dan MTLA 06 pada kedalaman >10000 m adanya anomali resistivitas yang memiliki *trend* arah tertentu sehingga diduga adanya patahan dalam, patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki arah *trend* yang sama, yaitu NE-SW. Secara keseluruhan, pada *line* 1 dapat diamati bahwa semua struktur dapat diidentifikasi dengan baik, namun dalam mengidentifikasi keberadaan Sesar Kendeng Waru pada penampang mode TE memiliki ambiguitas karena mengalami pergeseran dari letak patahan yang dikeluarkan

oleh PusGeN (2017) dan memiliki dimensi geometri yang sangat besar dibandingkan mode TM dan mode TE-TM.

Pada *line* 2, dapat diamati disekitaran titik MTLA 15, MTLA 16, dan MTLA 17 pada kedalaman >10000 m adanya anomali resistivitas yang memiliki *trend* arah tertentu sehingga diduga adanya patahan, sama seperti *line* 1 patahan ini diduga merupakan pola meratus karena memiliki arah *trend* yang sama, yaitu NE-SW. Secara keseluruhan, pada hasil penampang model resistivitas 2D *line* 2 dapat diamati bahwa semua struktur dapat diidentifikasi dengan baik, namun dalam menganalisis adanya struktur patahan minor yang berada di dekat titik MTLA 13, pada mode TE dan mode TE-TM struktur ini tidak dapat diidentifikasi sebaik mode TM karena tidak adanya kontras resistivitas yang signifikan, interpretasi adanya struktur patahan minor pada mode TE dan mode TE-TM ini dilakukan dengan merujuk pada geologi regional dan didukung dengan penampang 2D mode TM. Pada daerah di bawah titik MTLA 12 dapat diamati adanya kontras resistivitas yang diinterpretasikan sebagai struktur lipatan, adanya kontras resistivitas ini dapat diamati pada semua penampang model resistivitas 2D *line 2,* namun pada penampang model resistivitas 2D mode TE kontras resistivitas tersebut tidak sejelas dan setegas pada mode TM dan mode TE-TM.

Interpretasi yang dilakukan menunjukkan pada daerah penelitian terdapatnya struktur patahan Sesar Kendeng Blumbang, Sesar Kendeng Kedung Waru, lipatan antiklin, dan juga sesar-sesar minor, serta diduga adanya patahan dalam yang merupakan pola meratus. Keberadaan struktur patahan-patahan ini memiliki trend arah NE-SW. Pada penampang pemodelan resistivitas 2D dari tiga mode *line* 1 dan *line* 2 diatas, terdapat perbedaan persebaran nilai resistivitas dalam beberapa bagian pada hasil pemodelan, hal ini disebabkan pemodelan dengan mode TE (*Transverse Electric*), komponen yang terdapat pada bidang arah y dan z hanya komponen magnetik saja, sedangkan komponen listriknya berada sejajar dengan arah struktur, sehingga mode TE memiliki sifat yang tidak dapat mengalirkan arus listrik melewati batas antara daerah yang memiliki perbedaan nilai resistivitas yang berbeda secara vertikal, namun mode TE memiliki sensitivitas lateral yang baik. Adapun mode TM (*Transverse Magnetic*), komponen yang terdapat pada bidang y dan z merupakan komponen listrik, sehingga mode TM mampu mengalirkan arus listrik melewati batas antara bagian yang memiliki perbedaan resistivitas secara vertikal. Sedangkan mode TE-TM merupakan gabungan dari mode TE dan mode TM sehingga dapat memetakan adanya anomali resistivitas secara lateral dan vertikal dengan baik.

Jika diamati pada penampang model 2D dan distribusi persebaran nilai resistivitas kedalaman secara lateral, mode TE memiliki sensitivitas yang lebih baik daripada mode TM dalam memetakan distribusi nilai resistivitas rendah (konduktif) dan resistivitas tinggi secara lateral. Hal ini sesuai dengan teori pengukuran mode TE dan mode TM, pada mode TE komponen medan listrik melewati sumbu x (Ex) sedangkan pada sumbu y dan z merupakan komponen

magnetik sehingga mode TE dapat memetakan lapisan konduktif secara lateral dengan baik. Sedangkan mode TM komponen pada sumbu x merupakan komponen magnetik sedangkan pada sumbu y dan z merupakan komponen listrik, sehingga mode TM memiliki sensitivitas yang tidak lebih baik daripada mode TE dalam memetakan anomali resistivitas secara lateral, namun memiliki sensitivitas yang baik secara vertikal. Adapun mode TE-TM merupakan gabungan dari mode TE dan mode TM sehingga memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan distribusi resistivitas secara vertikal dan lateral.

Tabel 4. 2 Analisis mode TE, mode TM, dan mode TE-TM

Analisis	Mode TE	Mode TM	Mode TE-TM
RMS Error Inversi	1.87 pada *line* 1 dan 3.63 pada *line* 2	1.8 pada *line* 1 dan 5.78 pada *line* 2	2.19 pada line 1 dan 3.37 pada *line* 2
Jumlah Iterasi	91 iterasi pada *line* 1 dan 49 pada *line* 2	106 iterasi pada *line* 1 dan 32 pada *line* 2	88 iterasi pada *line* 1 dan 81 pada *line* 2
Sensitivitas	Lateral	Vertikal	Lateral dan vertikal

Jika diamati berdasarkan hasil inversi pemodelan 2D, pada *line* 1 nilai RMS Error yang terkecil dimiliki oleh mode TM sebesar 1.8 dan nilai RMS Error yang terbesar pada pemodelan dengan mode TE-TM sebesar 2.19, sedangkan pada *line* 2 nilai RMS Error yang terkecil dimiliki oleh mode TE-TM sebesar 3.376 dan nilai RMS Error yang terbesar pada pemodelan dengan mode TM sebesar 5.78. Jika diamati besarnya nilai RMS Error yang dihasilkan sangat tergantung pada jumlah iterasi yang dilakukan, dimana dapat diamati jika semakin banyak iterasi maka nilai RMS Error akan semakin kecil.

Dapat disimpulkan bahwa pemodelan dengan menggunakan mode TE memiliki sensitivitas lateral yang baik, mode TM memiliki sensitivitas vertikal yang baik. Hal ini sejalan dengan teori pengukuran mode TE dan mode TM. Adapun mode TE-TM merupakan gabung dari mode TE dan mode TM sehingga dapat memetakan adanya anomali secara lateral dan vertikal. Berdasarkan pemodelan diatas, dapat diamati adanya Sesar Kendeng Kedung Waru, Sesar Kendeng Blumbang, patahan minor, dan adanya patahan dalam, semua struktur patahan-patahan ini memiliki *trend* arah patahan NE-SW.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil simpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh mode pengukuran dalam pemodelan data dapat mempengaruhi distribusi nilai resistivitas yang dihasilkan. Hasil pengolahan data dengan menggunakan mode TE (*Transverse Electric*) memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas secara lateral. Hasil pengolahan data dengan mode TM (*Transverse Magnetic*) memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan resistivitas secara vertikal. Adapun mode TE-TM merupakan mode gabungan dari mode TE dan mode TM sehingga memiliki sensitivitas yang baik dalam memetakan kontras nilai resistivitas secara lateral maupun secara vertikal.
2. Hasil interpretasi didapatkan bahwa terdapatnya keberadaan struktur patahan yang ditandai dengan adanya kontras resistivitas (30-250 ohm.m) yang terdiri dari struktur patahan Sesar Kendeng Blumbang, Sesar Kendeng Kedung Waru, lipatan antiklin, dan juga sesar-sesar minor, serta diduga adanya patahan dalam yang merupakan pola meratus. Keberadaan struktur patahan-patahan ini memiliki trend arah NE-SW.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan studi pengembangan dengan melakukan pemodelan 3D *modelling* untuk mendapatkan visualisasi yang dan analisis yang lebih baik.
2. Perlu dilakukannya penelitian gravity untuk mendukung interpretasi dengan menganalisis persebaran nilai densitas bawah permukaan.
3. Perlu dilakukannya penelitian seismik untuk mendeliniasi batas lapisan/formasi secara detail.

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Al Basri, Alif. (2018), “Pemodelan Inversi 2-D Data Magnetotelurik pada Lapangan Panas Bumi “Basri” Sulawesi Barat”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Awaludin, Winarno. dkk. (2017), “Survei Magnetotelurik Daerah Panas Bumi Maranda, Kabupaten Poso, Provinsi Sulawesi Tengah”. Bulletin of Scientific Contribution. Vol. 15, No. 3. p-ISSN: 1693 – 4873. Bandung: Universitas Padjajaran.

Cagniard, L. (1953), "Basic Theory of the Magnetotelluric Method.", Geophysics., Vol.8., hal. 605-635.

Chave, A.D., Jones, A.G. (2012), “The magnetotelluric method: Theory and practice”. Cambridge University Press.

Darmawan, Crismanto, (2018). “Pemodelan Inversi 2D Data Magnetotelurik Menggunakan Algoritma *Non-Linear Conjugate Gradient* (NLCG) Untuk Pemetaan Resistivitas Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Paralana, Australia Selatan”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Fiona, S., Karsten, B. (2005), “Practical Magnetotellurics”. NewYork: Cambridge University Press.

Grandis, H. (2013), “Metoda Magnetotellurik (MT)”. Bandung: Institut Teknologi Bandung

Hall, R. (2012). “Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean, Tectonophysics”, 570–571, pp. 1-41. America: Society of Exploration Geophysicist

Haq, B.U., J. Hardenbol, and P.R. Vail. (1987), “Chronology of Fluctuating Sealevels since the Triassic”. Science, 235, pp. 1156-1167.

Husein S., T. A. (2016), “Jawa Timur bagian barat, Indonesia Buku Panduan Ekskursi Geologi Regional UGM”. Yogyakarta: UGM

Jasman, Andre Maries. (2018), “Identifikasi Sistem Panas Bumi Lapangan “SK” Berdasarkan Nilai Resistivitas Hasil Pemodelan Inversi 1D dan 2D Data Magnetotelurik”. Surabaya: Institut Teknologi Surabaya

Jupp, D.L., Vozoff, K. (1977), “Two-Dimensional Magnetotelluric Inversion”. Geophysical Journal International 50, 333–352.

Kauffman, A. dan Keller, G. V (1981), “The Magnetotelluric Sounding Method”. Elsevier, New York.

Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J., Syafi’i, M.A. (2016), “Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc”. Geophys. Res. Lett. 43, 1943–1949. 2016GL067941.

Lestari, W., Widodo, A., Warnana, D.D., Syaiffudin, F., Utama, W., dan Rohman, J.P.G.N. (2018), "Mapping of Kendeng Thrust Active Fault in East Java Using Magnetotelluric Method". EAGE-HAGI 1st Asia Pasific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering. http://doi.org/10.3997/2214-4609.20180tasari0424

Luckytasari, Nadia Putri. (2019), "Perbandingan Mode TE, TM dan TE-TM Terhadap Pemodelan Inversi 2-D Data Magnetotelurik Pada Lapangan Panas Bumi Arjuno Welirang". Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Novian, Moch. Indra, Salahuddin Husein, Rikzan Norma S. (2014), "Buku Panduan Ekskursi Geologi Regional". Yogyakarta: UGM

Nuraini, F. (2017), "Analisis Resistivitas Terhadap Pengaruh Mode Pada Pengolahan Data Magnetotellurik (Studi Kasus Daerah Panasbumi 'Z')". Makasar: Universitas Hasanuddin.

Oskooi, B. (2006), "1D Interpretation of The Magnetotelluric Data From Travale Geothermal Field in Italy". Journal of The Earth & Space Physics, Vol. 32, No.2, 2006, P.

Palacky, G.J. (1987), "Clay mapping using electromagnetic methods". First Break 5, 295–306. https://doi.org/10.3997/1365-2397.1987015

Prasetyadi, C. (2007), "Evolusi Tektonik Paleogen Jawa Bagian Timur". Disertasi, Program Doktor Teknik Geologi. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Pringgoprawiro, H., Sukido. (1992), "Peta Geologi Lembar Bojonegoro". Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Pringgoprawiro, H. (1983), "Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara Suatu Pendekatan Baru*",* Disertasi Doktor*,* Institut Teknologi Bandung, 239 hal, tidak diterbitkan.

Rachmaningtias, N., Setyawan, A. dan Raharjo, I.B. (2014), "Identifikasi Struktur Resistivitas Daerah Geothermal "T" Berdasarkan Hasil Pemodelan 2D Data Magnetotelurik". Youngster Physics Journal, Vol.3, No.2, hal. 143–146.

Rahmawati, Maryanto, S. dan Susilo, A. (2017), "Identifikasi Sistem Panas Bumi Daerah Cangar, Jawa Timur menggunakan Metode Magnetotelurik". *Journal of Physical Science and Engineering)*, Vol.2, No.2, 2017 hal. 72–82. http://doi.org/2541-2485.

Rodi, W. dan Mackie, R.L. (2001), "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion", Geophysics, Vol.66, No.1, hal. 174–187.

S. Gafoer and N. Ratman. (1999), "Peta Geologi Lembar Jawa Bagian Timur Skala 1:500.000"

Setijadji, L. (2010), "Segmented volcanic arc and its association with geothermal fields in Java Island" Indonesia, Proceeding World Geothermal Congress.

Simpson, F. dan Bahr, K. (2005), "Practical Magnetotellurics". New York: Cambridge University Press

Smirnov, M. Y. (2003), “Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point”. Geophys. J. Int.152, 1-7.

Sribudiyani, N. Muchsin, R. Ryacudu, T. Kunto, P. Astono, I. Prasetya, B. Sapiie, S. Asikin, A.H. Harsolumakso, and I. Yulianto. (2003), “The Collision of The East Java Microplate and Its Implication for Hydrocarbon Ocurences in The East Java Basin”. Jakarta: Proceedings of Indonesian Petroleum Association 29th Annual Convention and Exhibition

Sulistyo, A., Daud, Y. dan Ningsih, N.U. (2015), "Comparison Between Geostatistical (Cokriging and Averaging) Methods And Time Domain Electromagnetic (TDEM) Method for Static Shift Correction of Magnetotelluric (MT) Data". Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition

Telford, W. (1990), “Applied Geophysics”, *second edition*., Cambridge: Cambridge University Press

Unsworth, M. (2007), “Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism”.

V. R. Bemmelen, M. Nyhoff, and The Haque. “The Geology of Indonesia”, Nederland, 1949.

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

Wijaya, R. Aldi Kurnia. (2016), “1-D Inversion on Magnetotelluric Data in Field X Using Occam and Simulated Annealing Methods”. Surabaya: ITS

Zarkasyi, Ahmad. (2019). “Aplikasi Metode Magnetotelurik dalam Interpretasi Struktur Panas Bumi: Daerah Panas Bumi Gunung Karua, Tana Toraja Sulawesi Selatan”. Surabaya: JurnalGeosaintek, Vol. 5 No. 1. p-ISSN: 2460-9072, e-ISSN:2502-3659.

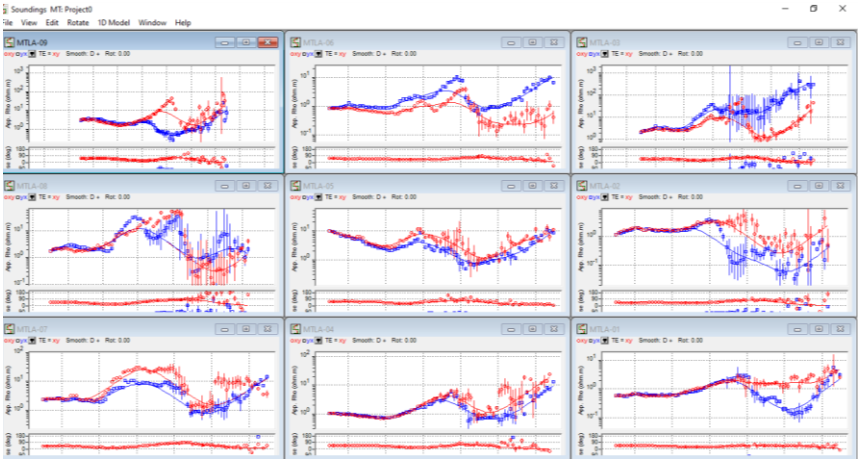
Halaman sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

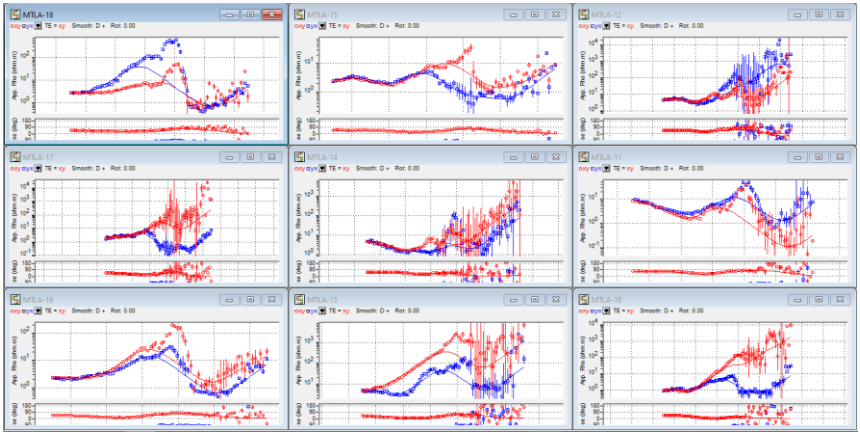
Adapun lampiran yang dicantumkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Koordinat Titik Pengukuran

Stasiun	Easting	Northing	Elevasi (m)
MTLA-01	666722	9188911	53
MTLA-02	661003	9191686	38
MTLA-03	656769	9195041	44
MTLA-04	651480	9195573	65
MTLA-05	647553	9198051	83
MTLA-06	642490	9200014	74
MTLA-07	636911	9203833	46
MTLA-08	632855	9203050	35
MTLA-09	626511	9204348	27
MTLA-10	624226	9200554	28
MTLA-11	627747	9199167	105
MTLA-12	632826	9197274	131
MTLA-13	637775	9194990	124
MTLA-14	642332	9193742	108
MTLA-15	647882	9191236	77
MTLA-16	652365	9190648	54
MTLA-17	654844	9187013	73
MTLA-18	661679	9186275	83



Gambar 1. Pengolahan *Editting* dan *Static Shift Correction Line* 1



Gambar 2. Pengolahan *Editting* dan *Static Shift Correction Line* 1

BIOGRAFI PENULIS

Rusba Saputra Rivensky lahir di Lhokseumawe, 21 November 1997 dari pasangan Bapak Usman Basyah dan Ibu Rukiah. Penulis merupakan anak keempat dari enam bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai di SDS 1 Yapena (2003-2009), kemudian melanjutkan sekolah di MTsS Yapena (2009-2012), kemudian MAS Yapena (2012-2015), terakhir penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama Menjadi mahasiswa di ITS, penulis aktif dalam kegiatan organisasi, diantaranya pernah menjadi Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS (HMTG ITS) periode 2018-2019, Sekretaris Jendral Lembaga Dakwah Departemen (Al-Ardh) periode 2018. Penulis juga pernah melakukan penelitian secara tim tentang *Integrated Geophysics Methods* di Desa Gondang, pada tahun 2019. Penulis juga memiliki pengalaman melaksanakan kerja praktik di Pertamina Hulu Energi (PH). Jika ingin berdiskusi lebih jauh mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi email: alfaathiinrivensky21@gmail.com