



TUGAS AKHIR - RF184838

***FILTERING DATA TIME SERIES MAGNETOTELURIK
MENGUNAKAN EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION
(EMD)***

NUGROHO SYARIF SETIAWAN
0341154000013

DOSEN PEMBIMBING:
WIEN LESTARI, S.T., M.T.
FIRMAN SYAIFUDDIN, S.Si, M.T.

Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RF184838

***FILTERING DATA TIME SERIES MAGNETOTELURIK
MENGUNAKAN EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION
(EMD)***

NUGROHO SYARIF SETIAWAN
0341154000013

DOSEN PEMBIMBING:
WIEN LESTARI, S.T., M.T.
FIRMAN SYAIFUDDIN, S.Si, M.T.

Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**



FINAL PROJECT - RF184838

MAGNETOTELLURIC TIME SERIES DATA FILTERING USING EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION (EMD)

NUGROHO SYARIF SETIAWAN
0341154000013

SUPERVISOR
WIEN LESTARI, S.T., M.T.
FIRMAN SYAIFUDDIN, S.Si, M.T.

Geophysical Engineering Department
Faculty of Civil Environmental and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

**HALAMAN INI
SEGAJA DIKOSONGKAN**

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “***Filtering Data Time Series Magnetotelurik Menggunakan Empirical Mode Decomposition (EMD)***” merupakan 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 telah ditulis lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 13 Juni 2019

Penulis

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

Tugas akhir ini diajukan oleh

Nama : Nugrobo Syarif Setiawan
NRP : 0341154000013
Departemen : Teknik Geofisika
Judul Tugas Akhir : Filtering Data Time Series
Magnetotellurik Menggunakan
Empirical Mode Decomposition (EMD)

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, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 16 Juli 2019.....

1. (Pembimbing I)
Wien Lestari, ST., M.T .
NIP. 19811002 201212 2 003
2. (Pembimbing II)
Firman Syarifuddin, S.Si., M.T
NIP. 19840911 201404 1 001
3. (Penguji I)
Anik Hilyah S.Si., M.T
NIP. 19790813 200812 2 002
4. (Penguji II)
Nita Ariyahati, S.T., M.Eng



Mengetahui,
Laboratorium Petrofisika
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Wien Lestari, ST., MT
NIP. 19811002 201212 2 003

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

FILTERING DATA TIME SERIES MAGNETOTELURIK MENGUNAKAN EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION (EMD)

Nama : Nugroho Syarif Setiawan
NRP : 0341154000013
Departemen : Teknik Geofisika
Pembimbing 1 : Wien Lestari, ST., M.T
Pembimbing 2 : Firman Syaifuddin, S.Si., M.T

ABSTRAK

Salah satu masalah penting dalam pengolahan data Magnetotelurik (MT) untuk diselesaikan adalah cara untuk melemahkan atau menghilangkan *noise* pada data. *Noise* dapat mengganggu informasi primer pada data Magnetotelurik sehingga menyebabkan kesalahan dalam memberikan gambaran persebaran resistivitas bawah permukaan. Penelitian ini menerapkan *filtering Empirical Mode Decomposition* (EMD) pada data *time-series* Magnetotelurik hingga dihasilkan komponen-komponen *Intrinsic Mode Functions* (IMFs). IMF ini memiliki sifat yang adaptif dan dapat menekan sifat non-stasioneritas yang disebabkan oleh keberadaan *noise*. Data kemudian diubah ke domain frekuensi dengan transformasi *Fast Fourier*. Spektrum dalam domain frekuensi dibandingkan antara data yang dilakukan proses *filtering* EMD dengan data yang langsung dilakukan proses transformasi *Fast Fourier*. Proses pengolahan data dilanjutkan sampai ke inversi 1D untuk mengetahui pengaruh proses *filtering* EMD pada hasil persebaran resistivitas bawah permukaan. Pengolahan data *time-series* MT menggunakan *filtering EMD* secara keseluruhan menghasilkan kurva *time-series* yang lebih halus dan mampu menekan sifat non stasioneritas yang disebabkan oleh adanya gangguan pada perambatan gelombang EM atau *noise* yang terekam saat pengukuran. Hasil model *cross section* 1D yang didapatkan juga memiliki kecenderungan pola persebaran resistivitas yang mirip dengan model validasi, meskipun dari segi nilai resistivitas dan kedalaman masih agak berbeda.

Kata kunci: *Empirical Mode Decomposition (EMD)*, *Intrinsic Mode Function (IMF)*, Magnetotelurik.

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

MAGNETOTELLURIC TIME SERIES DATA FILTERING USING EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION (EMD)

Name : Nugroho Syarif Setiawan
Students ID : 03411540000013
Department : Teknik Geofisika
Advisor 1 : Wien Lestari, ST., M.T
Advisor 2 : Firman Syaifuddin, S.Si., M.T

ABSTRACT

One of problems in Magnetotelluric data processing is how to reduce the effect of noise which can disturb the primary information in the data and may lead into incorrect resistivity distribution imaginary. In this paper, we propose a processing method using empirical mode decomposition (EMD) in original of Huang. This process used to filter out Magnetotelluric time series data from high frequency noise and resulting smooth frequency spectrum. The signal iteratively decomposed into several elementary oscillations called intrinsic mode functions (IMFs). These IMFs are local averages which are extracted through effective and simple collection of algorithms, also have adaptive characteristic and could pressed the non-stationarity caused by the presence of the noise. The filtered data transformed into frequency domain using fast Fourier transform, then we calculate the values of impedance, phase, and apparent resistivity. Obtained result data then compared with the data that processed without EMD filtering. These processes done until 1D inversion to see the differences at resistivity distribution model. MT time-series data processing using EMD gives smoother smoother time series curve in totality, also could suppress the non-stationarity character caused by disturbance at EM waves propagation or by noise that recorded at data acquisition process. The resulting 1D cross section model gives resistivity distribution pattern that mostly the same with validation model, although the resistivity values and the depth are slightly different.

Keywords: Empirical Mode Decomposition (EMD), Intrinsic Mode Function (IMF), Magnetotelluric.

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul “*Filtering Data Time Series* Magnetotelurik Menggunakan *Empirical Mode Decomposition (EMD)*” ini sesuai dengan waktu yang ditetapkan. Dalam melaksanakan penelitian dan penyusunan laporan ini, penulis mengalami banyak hambatan. Namun berkat bantuan berbagai pihak, akhirnya laporan ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih dan apresiasi setinggi tingginya kepada:

1. Orang tua yang senantiasa mendo'akan dan memberikan dukungan kepada penulis
2. Ibu Wien Lestari S.T., M.T. dan Bapak Firman Syaifuddin S.Si., M.T. sebagai dosen pembimbing yang senantiasa memberi arahan, bimbingan dan motivasi dalam pengerjaan penelitian maupun laporan
3. Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan Tugas Akhir di tempatnya, serta penyediaan data dan *software* penunjang
4. Bapak Ahmad Zarkasyi S.Si., M.T. dari PSDMBP sebagai pembimbing eksternal dalam pengerjaan penelitian ini
5. Ibu Anik Hilyah S.Si., M.T. dan Ibu Nita Ariyanti S.T., M.Eng. sebagai dosen penguju Tugas Akhir ini
6. Dr. Widya Utama DEA selaku Kepala Departemen Teknik Geofisika ITS
7. Teman seperjuangan Teknik Geofisika angkatan 2015 yang telah memberikan dukungan dalam bentuk apapun

Penulis menyadari bahwa dalam laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, sehingga penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun, untuk bisa menyempurnakan isi laporan ini. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan baik sekarang maupun di masa mendatang.

Surabaya, 12 Juni 2019

Penulis

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
1.6 Target Luaran	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Dasar Teori	3
2.1.1 Prinsip Dasar Magnetotelurik	3
2.1.2 Sumber dan Penjalaran Gelombang MT	4
2.1.3 Asumsi Dasar Metode Magnetotelurik	4
2.1.4 Persamaan <i>Maxwell</i>	6
2.1.5 <i>Skin Depth</i>	10
2.1.6 Tensor Impedansi dan Resistivitas Semu.....	10
2.1.7 Data <i>Time Series</i> MT	12
2.1.8 Mode <i>Transverse Electric</i> dan <i>Transverse Magnetic</i>	13
2.1.9 <i>Noise Cultural</i>	14
2.1.10 Transformasi <i>Fast Fourier</i>	15
2.1.11 <i>Robust Processing</i>	15
2.1.12 Inversi <i>Occam</i>	16
2.1.13 <i>Empirical Mode Decomposition (EMD)</i>	17
2.2 Penelitian Terdahulu	19
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1 Jenis Penelitian	23
3.2 Data dan Perangkat Lunak.....	23
3.2.1 Data.....	23
3.2.2 Perangkat Lunak	25

3.3	Langkah Kerja.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		41
4.1	Hasil Pengolahan Data <i>Time Series</i> dengan Filter EMD.....	41
4.2	Kurva Resistivitas Semu dan Fase	48
4.3	Hasil Penampang Model 1D	51
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Dasar Metode Magnetotelurik (Kearey, 2002)	3
Gambar 2. 2 Skema Timbulnya Gelombang Magnetotelurik (Grandis, 2013) ...	4
Gambar 2. 3 Ilustrasi Penjalaran Gelombang Elektromagnetik (Nave, 2012)	5
Gambar 2. 4 Rekaman 5 Komponen <i>Time-series</i> MT (Simpson dan Bahr, 2005)	12
Gambar 2. 5 Skema Mode TE dan TM pada Model 2D (Simpson dan Bahr, 2005)	13
Gambar 2. 6 Komponen IMF dari Data <i>Time-Series</i> (Chen dan Jegen-Kulcsar, 2007)	19
Gambar 2. 7 Kurva Resistivitas Semu dan Fase data Sintetik; hasil perhitungan analitik (biru) dan estimasi EMD (merah) dengan sedikit <i>noise</i> (Chen dkk, 2012).....	21
Gambar 3. 1 Kurva <i>Timeseries</i> Data .TS3 pada <i>Station</i> MT-11	23
Gambar 3. 2 Layout Akuisisi Metode Magnetotelurik (Simpson dan Bahr, 2005)	24
Gambar 3. 3 Diagram Pengolahan Data Magnetotelurik	26
Gambar 3. 4 Data MT dalam Format Biner (kiri) dan ASCII (kanan).....	27
Gambar 3. 5 Ilustrasi Proses <i>Resampling</i> Data Setiap 50 sekon.....	28
Gambar 3. 6 Hasil FFT Komponen Ex pada Data .TS3.....	29
Gambar 3. 7 Spektrum Frekuensi Rata-rata pada Komponen Ex Data .TS3	29
Gambar 3. 8 Kurva Komponen Ex MT-11 Hasil Penggabungan 3 Data Frekuensi.....	30
Gambar 3. 9 Tampilan <i>Input</i> Data pada SSMT2000	34
Gambar 3. 10 Tampilan Pengaturan Parameter FFT	35
Gambar 3. 11 Tampilan Pengaturan Parameter Proses <i>Robust</i>	36
Gambar 3. 12 Kurva Data MT-11 Sebelum <i>Editing</i>	37
Gambar 3. 13 Kurva Data MT-11 Setelah <i>Editing</i> dengan <i>Smoothing</i> D+.....	38
Gambar 3. 14 Kurva Data MT-11 Setelah <i>Editing</i> dengan <i>Smoothing Numerical</i>	38
Gambar 3. 15 Tampilan Inversi 1D Data MT-11; tampilan kiri merupakan kurva data observasi berupa <i>rho apparent</i> dan fase (<i>input</i>), tampilan kanan merupakan kurva hasil inversi (<i>output</i>)	39
Gambar 4. 1 Hasil Proses EMD pada Komponen Ex Data TS5 MT-08	43

Gambar 4. 2 Spektrum Hasil Rata-Rata pada Komponen Ex Data .TS3 (frekuensi tinggi) MT-08	44
Gambar 4. 3 Spektrum Hasil Rata-Rata pada Komponen Ex Data .TS4 (frekuensi menengah) MT-08	44
Gambar 4. 4 Spektrum Hasil Rata-Rata pada Komponen Ex Data .TS4 (frekuensi rendah) MT-08.....	45
Gambar 4. 5 Kurva <i>Time Series</i> Hasil <i>Filtering EMD</i> pada Data .TS3 MT-08	47
Gambar 4. 6 Kurva <i>Time Series</i> Hasil <i>Filtering EMD</i> pada Data .TS4 MT-08	47
Gambar 4. 7 Kurva <i>Time Series</i> Hasil <i>Filtering EMD</i> pada Data .TS5 MT-08	48
Gambar 4. 8 Kurva Resistivitas Semu (Atas) dan Kurva Fase (Bawah) pada Titik MT-08 Hasil Pengolahan Data dengan <i>Filtering EMD</i> Berbasis MATLAB	49
Gambar 4. 9 Kurva Resistivitas Semu (Atas) dan Kurva Fase (Bawah) pada Titik MT-08 Hasil Pengolahan Data tanpa <i>Filtering EMD</i> di SSMT2000.....	50
Gambar 4. 10 Penampang <i>Cross Section</i> Inversi 1D <i>Occam</i> pada Data MT Hasil Pengolahan dengan <i>Filtering EMD</i>	52
Gambar 4. 11 Penampang <i>Cross Section</i> Inversi 1D <i>Occam</i> pada Data MT Hasil Pengolahan tanpa <i>Filtering EMD</i>	52
Gambar 4. 12 Penampang <i>Cross Section</i> Inversi 1D <i>Occam</i> pada Data MT Hasil Pengolahan tanpa <i>Filtering EMD</i> oleh PSDMBP	54

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Rincian Titik Penelitian	24
Tabel 3. 2 Rincian Karakter Setiap Data untuk proses <i>Resampling</i>	28
Tabel 3. 3 Komponen dalam Menentukan Koherensi Parsial	32
Tabel 4. 1 Karakteristik Data <i>Input</i>	41
Tabel 4. 2 Hasil Analisis Spektrum	46

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Magnetotelurik (MT) merupakan metode elektromagnetik pasif yang dapat memberi gambaran persebaran resistivitas bawah permukaan. MT telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang di geofisika mulai untuk eksplorasi sampai penelitian kerak bumi. Salah satu masalah kunci dalam pengolahan data MT adalah bagaimana untuk melemahkan *noise* kultural maupun meteorologis yang ada, karena *noise* tersebut dapat mengganggu informasi primer yang ada di data MT sehingga menyebabkan penggambaran resistivitas bawah permukaan yang tidak sesuai (Borah dkk., 2015). Penelitian sebelumnya mengenai teknik pengolahan data MT untuk mengurangi *noise* ini telah dilakukan oleh Egbert pada 1986 dengan menggunakan analisa *robust* otomatis. Yamane dan Takasugi tahun 1997 melakukan penelitian menggunakan proses *cascade decimation*. Nagata, dkk pada tahun 2012 melakukan *filtering* data *time-series* menggunakan filter IIR.

Empirical Mode Decomposition (EMD) adalah metode yang dapat mendekomposisi sinyal dalam domain waktu dan menghasilkan sekumpulan *intrinsic mode function* (IMF). Setiap IMF bersifat adaptif dan dapat menekankan sifat non-stasioneritas pada data *time-series*. Non-stasioneritas yang disebabkan oleh *noise* pada data elektromagnetik mempengaruhi perhitungan spektra *Fourier* dan estimasi fungsi transfer pada pengolahan data MT (Neukirch, 2014). Penggunaan EMD dalam pengolahan data MT telah dilakukan oleh Chen pada tahun 2007 dan pada tahun 2012 dikembangkan lagi untuk mengolah data MT laut. Pada penelitian ini akan digunakan metode EMD untuk melakukan *filtering* data *time series* MT sehingga efek non-stasioneritas yang disebabkan oleh *noise* dapat diredam.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah

- Bagaimanakah langkah penggunaan *filtering Empirical Mode Decomposition* dalam pengolahan data Magnetotelurik?
- Bagaimanakah pengaruh aplikasi filter *Empirical Mode Decomposition* pada pengolahan data Magnetotelurik?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan diteliti yaitu:

- a. Data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP).
- b. Data time-series yang digunakan memiliki ekstensi .TS3 .TS4 dan .TS5 sebanyak 5 *station*.
- c. Proses dekomposisi *Empirical Mode Decomposition* dilakukan dengan menggunakan software MATLAB.
- d. Pengolahan data dilakukan sampai inversi 1D dengan metode *Occam* untuk satu *line* penelitian.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk:

- a. Menerapkan filter *Empirical Mode Decomposition* dalam pengolahan data Magnetotelurik.
- b. Mendapatkan model 1D data Magnetotelurik hasil pengolahan dengan menggunakan *filtering Empirical Mode Decomposition*.
- c. Menganalisis hasil pengolahan data Magnetotelurik dengan menggunakan *filtering Empirical Mode Decomposition*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapat dari penelitian ini adalah:

- a. Dapat menjadi salah satu penyelesaian untuk *noise filtering* dalam pengolahan data Magnetotelurik
- b. Dapat menjadi rujukan untuk pengembangan *software* pengolahan data Magnetotelurik kedepan.

1.6 Target Luaran

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

BAB II

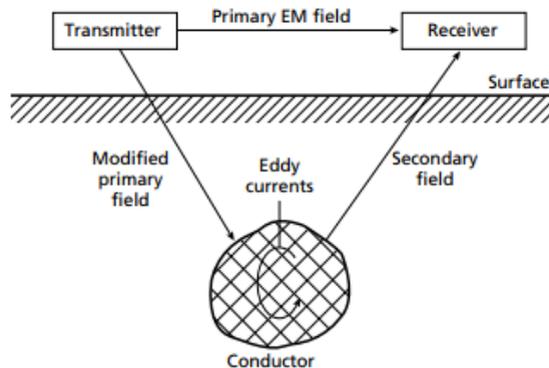
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Prinsip Dasar Magnetotelurik

Metode magnetotelurik (MT) merupakan metode eksplorasi geofisika pasif yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Medan EM tersebut ditimbulkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks dengan spektrum frekuensi yang sangat lebar (10^{-5} Hz – 10^4 Hz). Magnetotelurik 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 dalam (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).

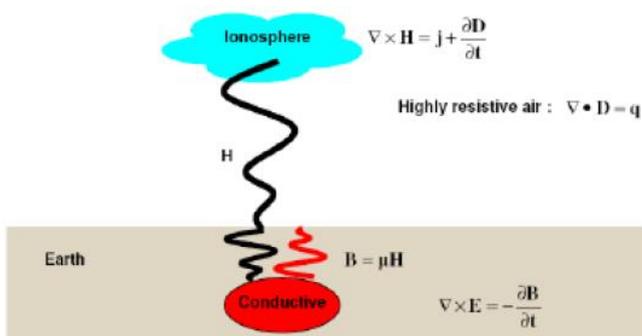
Medan elektromagnetik alami (medan elektromagnetik primer) sebagai sumber metode magnetotelurik sampai ke bumi dengan memiliki variasi terhadap waktu. Medan elektromagnetik tersebut menginduksi *ore body* di bawah permukaan bumi sehingga *eddy current* (arus *telluric*) yang menimbulkan medan elektromagnetik sekunder. *Receiver* (RX) yang berada di permukaan menangkap total medan elektromagnetik sebagai penjumlahan dari medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder (Liat dkk., 2010). Proses tersebut digambarkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Prinsip Dasar Metode Magnetotelurik (Kearey, 2002)

2.1.2 Sumber dan Penjalaran Gelombang MT

Bumi memiliki medan magnet yang konstan, namun yang dibutuhkan dalam metode MT bukanlah medan magnet yang konstan, melainkan medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu, karena 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 meteorologi 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 (TEM). 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). Skema dihasilkannya gelombang Magnetotelurik digambarkan pada gambar 2.2.



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

2.1.3 Asumsi Dasar Metode Magetotellurik

Anggapan mengenai adanya induksi elektromagnetik di bumi didasarkan pada sejumlah asumsi yang diajukan oleh Cagniard (1953) dan Keller & Frischnecht (1966) sebagai berikut:

- 1) Memenuhi persamaan umum elektromagnetik Maxwell
- 2) Bumi tidak membangkitkan energi elektromagnetik, namun hanya mendisipasi dan menyerapnya

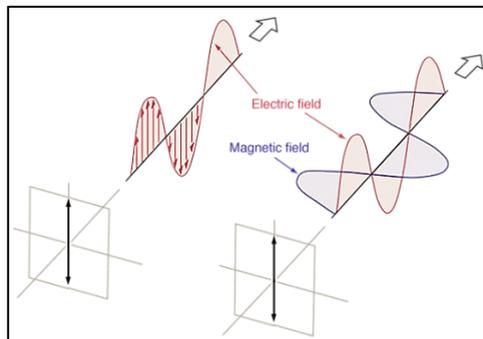
- 3) Semua medan diperlakukan secara konservatif dan analitik dari sumbernya
- 4) Sumber medan elektromagnetik alami dihasilkan oleh sistem arus skala besar di ionosfer dan bisa dianggap sebagai gelombang elektromagnetik polarisasi bidang yang bersifat seragam. Gelombang ini menginduksi bumi dengan posisi yang hampir vertikal, asumsi ini bisa tidak berlaku di daerah kutub dan ekuator.
- 5) Tidak ada akumulasi muatan bebas di suatu lapisan bumi.
- 6) Arus bersifat konservatif, dan bumi berperan sebagai konduktor *ohmic* yang memenuhi persamaan:

$$J = \sigma E$$

Dimana, J adalah total rapat arus (A/m^2), σ adalah konduktifitas pada suatu medium (S/m) dan E adalah medan listrik (V/m)

- 7) Medan listrik perpindahan (*displacement field*) bersifat kuasi statik untuk periode *sounding* MT. Sehingga perubahan arus perpindahan terhadap waktu tidak dianggap jika dibandingkan dengan arus konduksi yang bervariasi terhadap waktu
- 8) Segala variasi dalam permitivitas listrik dan permeabilitas magnetik pada batuan bisa diabaikan jika dibandingkan dengan variasi konduktifitas batuan total.

Dalam asumsi dasar MT dari Cagniard (1953), bumi dianggap sebagai lapisan horisontal yang bersifat homogen isotropis. Gelombang elektromagnetik alam yang berinteraksi dengan bumi merupakan gelombang bidang. Gelombang ini hanya berubah searah penjalaran gelombangnya dan konstan pada bidang yang tegak lurus dalam arah penjalarnya.



Gambar 2. 3 Ilustrasi Penjalaran Gelombang Elektromagnetik (Nave, 2012)

2.1.4 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan sintesa hasil-hasil eksperimen (empiris) mengenai fenomena listrik- magnet yang didapatkan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coloumb di samping yang dilakukan oleh Maxwell sendiri. Dalam bentuk differensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Hukum Faraday} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Hukum Ampere} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad \text{Hukum Gauss} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Hukum Gauss untuk magnetisasi} \quad (2.4)$$

Dimana, E: medan listrik (Volt/m), B: fluks atau induksi magnetik (Weber/m² atau Tesla), H: medan magnet (Ampere/m), j: rapat arus (Ampere/m²), D: perpindahan listrik (Columb/m²), dan q: rapat muatan listrik (Columb/m³)

Persamaan (2.1) diturunkan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menyebabkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang menyebabkannya. Persamaan (2.2) merupakan generalisasi teorema Ampere dengan memperhitungkan hukum kekekalan muatan. Persamaan tersebut menyatakan bahwa medan magnet timbul akibat fluks total arus listrik yang disebabkan oleh arus konduksi dan arus perpindahan. Persamaan (2.3) menyatakan hukum Gauss yaitu fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut. Sedangkan persamaan (2.4) yang identik dengan persamaan (2.3) berlaku untuk medan magnet, namun dalam hal ini tidak ada monopol magnetik (Kaufman dan Keller, 1981).

Dari persamaan Maxwell kemudian dapat diturunkan untuk mendapatkan fungsi transfer yang digunakan dalam pengolahan data megnetotellurik. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Maxwell dari Hukum Faraday dan Hukum Ampere yang menggambarkan hubungan antara medan listrik dan medan magnet, dengan:

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

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

μ merupakan permeabilitas magnetik (H/m), σ merupakan konduktifitas listrik (S/m), dan ϵ merupakan permitivitas listrik (F/m). Dengan persamaan di atas kemudian dimasukkan ke persamaan (2.1) dan (2.2) sehingga didapatkan didapatkan:

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

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

Kedua persamaan diatas dilakukan operasi matematis *curl* dimana $\nabla \times \alpha F = \alpha(\nabla \times F)$ sehingga,

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

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

Kemudian dilakukan rotasi dengan faktor identitas dengan $\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ sehingga

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} \quad (2.13)$$

Dengan memasukkan persamaan 2.10 ke 2.12 dan persamaan 2.11 ke 2.13 didapatkan:

$$-\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (2.14)$$

$$\sigma(\nabla \times \vec{E}) + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} \quad (2.15)$$

Asumsi di ruang hampa adalah $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ dan $\nabla \cdot \vec{H} = 0$, juga memasukkan persamaan 2.8 dan persamaan 2.9 sehingga

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) + \mu\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \right) \quad (2.17)$$

Berdasarkan asumsi, medan elektromagnetik (variabel \vec{E} dan \vec{H}) bersifat konservatif yang hanya bergantung pada posisi dan waktu penjalaran harmonik. Oleh karena itu, variasi terhadap waktu dapat direpresentasikan oleh fungsi periodik sinusoidal dengan solusi persamaan gelombang sebagai berikut:

$$E_{(z,t)} = E_0 \cdot \cos(kz - \omega t) \quad (2.18)$$

$$H_{(z,t)} = H_0 \cdot \cos(kz - \omega t) \quad (2.19)$$

atau dalam bentuk kompleks:

$$E_{(z,t)} = E_0 \cdot e^{-i(kz - \omega t)} \quad (2.20)$$

$$H_{(z,t)} = H_0 \cdot e^{-i(kz - \omega t)} \quad (2.21)$$

Persamaan 2.20 dan 2.21 kemudian diturunkan terhadap waktu sehingga,

$$\frac{\partial E}{\partial t} = E_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot i\omega = i\omega \cdot \vec{E} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = H_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot i\omega = i\omega \cdot \vec{H} \quad (2.23)$$

turunan keduanya:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = i\omega(i\omega) \cdot E_0 \cdot e^{i\omega t} = -\omega^2 \vec{E} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = i\omega(i\omega) \cdot H_0 \cdot e^{i\omega t} = -\omega^2 \vec{H} \quad (2.25)$$

Dengan i adalah bilangan imajiner, dan $i^2 = -1$

Hasil penurunan persamaan gelombang diatas kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan 2.16 dan 2.17 sehingga didapatkan persamaan

$$\nabla^2 \vec{E} = (i\omega\mu\sigma - \mu\varepsilon\omega^2) \vec{E} \quad (2.24)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = (i\omega\mu\sigma - \mu\varepsilon\omega^2) \vec{H} \quad (2.25)$$

Dari kedua persamaan di atas kemudian diterapkan ke persamaan Helmholtz dimana $\nabla^2 \vec{E} = k^2 \vec{E}$, sehingga didapat:

$$k^2 \vec{E} = (i\omega\mu\sigma - \mu\varepsilon\omega^2) \vec{E} \quad (2.26)$$

$$k^2 \vec{H} = (i\omega\mu\sigma - \mu\varepsilon\omega^2) \vec{H} \quad (2.27)$$

sehingga,

$$k^2 = (i\omega\mu\sigma - \mu\varepsilon\omega^2) \quad (2.28)$$

Dalam studi gelombang elektromagnetik pada metode MT, Perpindahan arus (*displacement current*) dapat diabaikan, Oleh karena itu, suku yang mengandung ε (permitivitas listrik) dapat diabaikan terhadap suku yang mengandung σ (konduksi listrik) karena harga konduktivitas listrik lebih besar dibandingkan dengan dengan harga permeabilitas dan harga permitivitasnya ($\sigma \gg \omega\varepsilon$). sehingga persamaan diatas menjadi :

$$k = \sqrt{i\omega\mu\sigma} \quad (2.30)$$

Nilai k merupakan suatu bilangan kompleks yang menyatakan kondisi dari suatu medium. Nilai k bilangan gelombang yang dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$k = \pm (\alpha + i\beta) \quad (2.30)$$

faktor i atau identitas disini harus didefinisikan terlebih dahulu. $i = e^{i\pi/2}$ sehingga $\sqrt{i} = \pm e^{i(\frac{\pi}{4})}$. Dengan identitas *Euler* dimana $e^{ix} = \cos x + i \sin x$

sehingga didapatkan $\sqrt{i} = \pm (\cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4}) = \pm (1 + i) \frac{1}{2} \sqrt{2}$. Nilai i dimasukkan ke persamaan 2.29 sehingga didapatkan:

$$k = \pm (1 + i) \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.31)$$

dimana,

$$\text{komponen riil } (\alpha) = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.32)$$

$$\text{komponen imajiner } (\beta) = i \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (2.33)$$

2.1.5 Skin Depth

Respon medan elektromagnetik pada batuan di bawah permukaan pada kedalaman yang dalam dapat diperoleh dengan menaikkan periode sounding elektromagnetik. Prinsip ini sesuai dengan persamaan *electromagnetic skin depth* yang menggambarkan kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik ketika berdifusi ke dalam suatu medium (Simpson dan Bahr, 2005).

$$\delta = \frac{1}{\text{komponen riil } k (\alpha)} \quad (2.34)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} \quad (2.35)$$

dengan $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, $\omega = 2\pi f$, dan $\rho = 1/\sigma$, maka:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.36)$$

Dimana δ adalah *electromagnetic skin depth*, f adalah frekuensi, dan ρ adalah apparent resistivity. Persamaan diatas menunjukkan bahwa skin depth tidak hanya bergantung pada nilai resistivitas batuan di bawah permukaan, tapi juga bergantung pada periode atau frekuensi alat yang digunakan. Semakin tinggi frekuensi alat yang digunakan maka akan semakin dangkal penetrasinya. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi alat yang digunakan, semakin dalam pula penetrasi yang didapatkan.

Medan elektromagnet yang menginduksi Bumi secara alami dan digunakan untuk penelitian MT memiliki rentang periode dari 10^{-3} hingga 10^5 s. Jika diasumsikan resistivitas rata-rata batuan di kerak dan mantle Bumi adalah 100 Ω m, maka dengan persamaan di atas didapatkan penetrasi gelombang elektromagnetik mampu mencapai ~160 m hingga >500 km. Inilah keuntungan menggunakan metode MT dibandingkan metode elektromagnetik yang lainnya (Simpson dan Bahr, 2005).

2.1.6 Tensor Impedansi dan Resistivitas Semu

Pengukuran medan listrik dan medan magnet sangat berkaitan dengan impedansi. Impedansi merupakan perbandingan antara medan listrik dan medan

magnet. Secara eksplisit, hubungan linier antara medan listrik, medan magnet, dan impedansi dapat dirumuskan pada persamaan 2.16 sebagai berikut (Smirnov, 2003):

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

dimana $[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$ merepresentasikan tensor impedansi. Untuk nilai Z sendiri didapatkan dari persamaan Maxwell 1 (Persamaan 2.8) dimana:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \text{komponen E dan H tegak lurus sehingga,}$$

$$\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} \quad (2.38)$$

dengan memasukkan persamaan 2.23 dan 2.20 maka didapatkan persamaan:

$$\frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \frac{\mu\omega}{k} \quad (2.39)$$

$$Z = \frac{\vec{E}_x}{\vec{H}_y} = \frac{\mu\omega}{\sqrt{\mu\omega i\sigma}} = \sqrt{\frac{\mu^2\omega^2\rho}{\mu\omega i}} \quad (2.40)$$

Pada model bumi 2D, dari persamaan 2.37 komponennya memiliki nilai dimana

$$\begin{aligned} Z_{zz} = Z_{yy} &= 0 \\ Z_{xy} &\neq -Z_{yx} \end{aligned} \quad (2.41)$$

sehingga:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.42)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} \quad (2.43)$$

Resistivitas bumi tidak memiliki nilai yang konstan dan bervariasi terhadap kedalaman (arah z). Fenomena ini disebut dengan resistivitas semu (ρ_a). Dari persamaan 2.40 maka didapatkan:

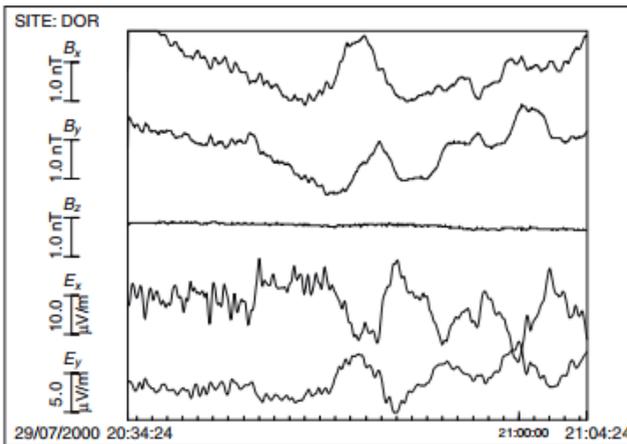
$$\rho_a = \frac{i}{\mu\omega} |z^2| \tag{2.44}$$

dan nilai fasenya adalah:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{Im(Z)}{Re(Z)}\right) \tag{2.45}$$

2.1.7 Data Time Series MT

Data *time series* digital yang didapat selama akuisisi MT bisa mencapai ukuran beberapa gigabyte, namun data yang akhirnya akan diinterpretasikan dengan skema pemodelan numerik hanya terdiri atas beberapa ratus data per stasiun yang merepresentasikan fungsi transfer yang bergantung pada frekuensi. Satu data *time series* mengandung informasi mengenai banyak periode sehingga mengenai penetrasi kedalaman perlu dilakukan pengolahan data melibatkan transformasi Fourier untuk mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi. Reduksi data didapat dengan melakukan *stacking* data sampai spektra tertentu pada domain frekuensi.

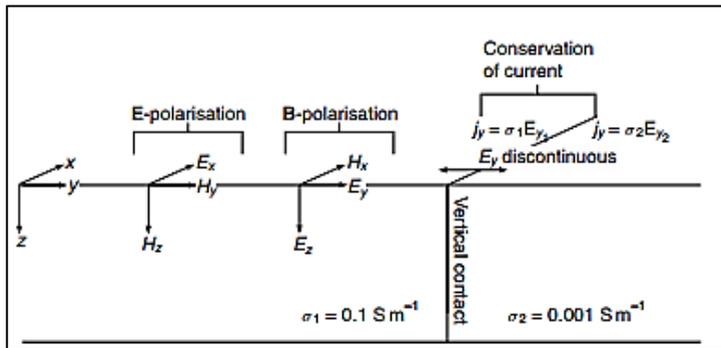


Gambar 2. 4 Rekaman 5 Komponen *Time-series* MT (Simpson dan Bahr, 2005)

Gambar 2.4 merupakan contoh data *time-series* MT dengan *sampling rate* $\Delta t = 2$ s dan *time window* 30 menit sehingga didapati 900 data yang diplot untuk setiap komponen. Terdapat 5 komponen pada gambar tersebut dengan besar data 2 byte. *Time window* 30 menit merepresentasikan 9 kbytes data. Data *time-series* direkan selama beberapa minggu atau bulan sehingga dapat dengan mudah menghasilkan 10 Mbytes data. Di sisi lain fungsi transfer dari suatu stasiun memiliki dataset yang sangat kecil yang digambarkan dalam tensor impedansi pada nilai frekuensi evaluasi 30 – 50 (Simpson dan Bahr, 2005).

2.1.8 Mode Transverse Electric dan Transverse Magnetic

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 2.3.



Gambar 2. 5 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 (E_x) menyebabkan medan magnet bervariasi pada arah tegak lurus *strike* (B_y) dan arah vertikal (B_z):

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = i\omega B_z \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial t} = -i\omega B_y \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x \quad (2.48)$$

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

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu_0\sigma E_z \quad (2.49)$$

$$-\frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu_0\sigma E_y \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x \quad (2.51)$$

2.1.9 Noise Cultural

Noise yang disebabkan oleh adanya aktivitas manusia disebut *noise cultural*. Pada data sounding MT *noise* ini bisa disebabkan oleh keberadaan kabel listrik, pompa bawah tanah, turbin angin, kereta listrik dan area pertambangan. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan elektrifikasi di bumi maka efek *noise* kultural yang ada saat akuisisi data MT juga akan meningkat (van Leeuwen, 2016). *Noise* kultural dapat dibagi menjadi *noise* elektromagnetik aktif dan pasif. Disamping kedua tipe tersebut juga terdapat tipe *noise* lain yang disebabkan oleh kendaraan yang lewat atau getaran buatan di permukaan, *noise* ini biasanya disebut *noise motional* (Szarka, 1988).

Karena tidak selalu mungkin untuk menghindari semua sumber *noise* kultural selama akuisisi data MT, maka *noise* tersebut harus dihilangkan dari data MT pada saat pengolahan data sehingga ditemukan model resistivitas bawah permukaan yang lebih akurat. Ketika amplitudo dari *noise* yang terekam lebih besar dari sinyal elektromagnetik, maka akan sulit untuk merekonstruksi sinyal Magnetotelurik. Efek *noise* pada data MT dapat dihilangkan atau diredam dengan berbagai teknik pengolahan mulai dari analisa visual dan penghapusan data *time-series*, evaluasi parameter statistik pada domain frekuensi, menggunakan metode *remote reference* sampai metode *robust processing* (van Leeuwen, 2016).

2.1.10 Transformasi *Fast Fourier*

Transformasi *Fourier* adalah suatu metoda yang digunakan untuk mengubah sinyal suatu gelombang dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. Proses sebaliknya adalah Inversi Transformasi *Fourier* (*Inverse Fourier Transform*). *Fast Fourier Transform* (FFT) adalah teknik komputasi yang digunakan untuk menangani transformasi *Fourier* dari data diskrit dengan jumlah yang banyak secara efisien. Efisiensinya terutama berawal dari kemampuannya untuk memanfaatkan sifat – sifat periodik yang terdapat dalam fungsi – fungsi sinus maupun cosinus. Pada persamaan berikut, G_k merupakan suku genap dan H_k adalah suku ganjil (Heditama, 2011).

$$F_k = G_k + W^{-k}H_k \quad (2.52)$$

dengan,

$$G_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} g_k(W^2)^{-nk} \text{ dan } H_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} h_k(W^2)^{-nk} \quad (2.45)$$

$$k = 0,1,2, \dots \left(\frac{N}{2} - 1 \right)$$

2.1.11 *Robust Processing*

Robust processing merupakan teknik pengolahan data secara statistik dengan menggunakan pembobotan. Tujuan dari proses ini yaitu mengetahui jenis data yang termasuk *noise* atau bukan. *Robust processing* menggunakan beberapa pengukuran dari *departure* suatu kontribusi individual dari rata-rata untuk merendahkan bobot *outliers* pada iterasi selanjutnya. *Outlier* adalah data dengan nilai yang menyimpang jauh dari nilai rata-rata, umumnya data tersebut dapat dianggap sebagai *noise* sehingga *robust processing* dapat berperan sebagai filter *noise* awal bagi data MT (Simpson F. dan Bahr K., 2005).

Pada prinsipnya, teknik *robust* hampir sama dengan teknik *least square*, yaitu mengikuti *trend* data yang lebih dominan dan meminimalisasi pengaruh *outlier* terhadap data. Akan tetapi, pengaruh *outlier* pada *robust* disini lebih sedikit dibandingkan dengan *least square*. Sehingga grafik hasil dari teknik *robust* akan terlihat lebih bagus dibandingkan dengan *least square* (Rusbiyanto, 2011).

2.1.12 Inversi Occam

Algoritma Occam mengarah pada model sederhana yang memiliki parameter dari semua kemungkinan model yang sesuai. Ketika ingin mendapatkan nilai *misfit* yang lebih kecil dari kurva pengukuran dan pengamatan dari $\rho(\omega)$, $\phi(\omega)$, maka kompleksitas dari model yang didapatkan akan bertambah dan hasilnya seringkali menjadi tidak dapat dipercaya. Kompleksitas model seharusnya sama dengan kompleksitas medium, namun tidak lebih kompleks dari medium.

Metode Occam bertujuan untuk menghasilkan data yang lebih *smooth* dengan meminimumkan nilai dari *roughness*. *Roughness* didefinisikan dalam turunan pertama dan kedua dari resistivitas terhadap kedalaman sebagai berikut:

$$R_1 = \int \left(\frac{dm}{dz} \right)^2 dz \quad (2.48)$$

$$R_2 = \int \left(\frac{d^2m}{dz^2} \right)^2 dz \quad (2.49)$$

Untuk mendapatkan model yang *smooth* dalam kasus nonlinier, lebih mudah dilakukan dengan pendekatan secara permasalahan linear kedepan. Secara umum solusi dari permasalahan kedepan adalah sebagai berikut:

$$d_j = F_j(m) \quad (2.50)$$

Ketika permasalahan kedepannya berupa linier, maka persamaan dapat diubah menjadi:

$$d = \underline{G}(m) \quad (2.51)$$

\underline{G} adalah matriks $M \times N$. Dalam kasus linier, misfit (X^2) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$X^2 = \left\| \underline{W}d - \underline{W} \underline{G}m \right\|^2 \quad (2.52)$$

\underline{W} merupakan diagonal matriks $M \times M$. *Roughness* pada persamaan (2.13) dan (2.14) dapat diubah menjadi:

$$R_1 = \left| \underline{\partial} m \right|^2 \quad (2.53)$$

$$R_2 = \left| \underline{\partial}^2 m \right|^2$$

Sehingga untuk persamaan pemodelan dalam permasalahan linier adalah sebagai berikut:

$$U = \left| \underline{\partial} m \right|^2 + \mu^{-1} \left\{ \left| \underline{W} d - \underline{W} \underline{G} m \right|^2 - X_*^2 \right\} \quad (2.54)$$

Sedangkan untuk persamaan pemodelan dalam permasalahan nonlinier dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$U = \left| \underline{\partial} m \right|^2 + \mu^{-1} \left\{ \left| \underline{W} d - \underline{W} F[m] \right|^2 - X_*^2 \right\} \quad (2.55)$$

Solusi dari permasalahan inversi Occam dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m_{k+1} = [\mu \partial^T \partial + (W J_k)^T W J_k]^{-1} (W J_k)^T W d_k \quad (2.56)$$

(Constable dkk., 1987)

2.1.13 Empirical Mode Decomposition (EMD)

EMD merupakan metode yang didasarkan pada ekstraksi langsung energi yang berasosisasi dengan bermacam skala intrinsik waktu untuk menghasilkan sekumpulan *intrinsic mode function (IMF)* seperti pada gambar 2.6. Hasil dekomposisi dapat dilihat sebagai sebuah ekspansi data dalam sekumpulan IMF. Setiap IMF dapat menekankan sifat *non-stationer* pada data *time-series*. Yang paling utama adalah IMF memiliki sifat yang adaptif. Sifat adaptif dan lokalitas ini sangat penting untuk data non stasioner. IMF harus memenuhi 2 kondisi berikut:

1. Jumlah ekstrema dan perpotongan nol dalam data harus sebanding atau berbeda paling banyak satu.
2. Pada titik mana saja, nilai rata rata dari sampul yang didefinisikan oleh maksima lokal dan minima lokal adalah nol.

Persyaratan ini diambil karena merepresentasikan mode osilasi mengikatkan dalam data. Setiap IMF memiliki kemampuan untuk mengandung frekuensi dan amplitudo modulasi dan mungkin memiliki karakter non stasioner (Chen dan Jegen-Kulcsar, 2007).

Sebuah IMF merepresentasikan mode osilasi sederhana sebagai lawan dari fungsi harmonik sederhana. Dari definisi diatas, sinyal $x(t)$ dapat didekomposisikan sebagai beriku (Huang dkk, 1998):

- 1) Identifikasi semua maksima lokal, lalu hubungkan semua maksima lokal dengan sebuah sebuah garis spline kubuk sebagai sampul atas.
- 2) Ulangi prosedur untuk minima lokal sehingga didapati sampul bawah. Sampul atas dan bawah harus mencakup semua data diantaranya.
- 3) Rata rata dari sampul bawah dan atas disebut m_1 , dan perbedaan antara sinyal $x(t)$ dan m_1 adalah komponen pertama h_1 ,

$$x(t) - m_1 = h_1 \tag{2.57}$$

Idealnya h_1 adalah IMF, sehingga h_1 adalah komponen pertama dari $x(t)$

- 4) Jika h_1 bukan sebuah IMF, h_1 dianggap sebagai sinyal asli dan mengulang langkah 1, 2 dan 3, sehingga

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \tag{2.58}$$

setelah diulang sebanyak k, h_{1k} menjadi sebuah IMF yang mana

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \tag{2.59}$$

kemudian dianggap sebagai

$$h_{1k} = c_1 \tag{2.60}$$

Komponen pertama IMF didapatkan dari data asli, c_1 mengandung skala paling baik atau komponen periode paling baik dari sinyal.

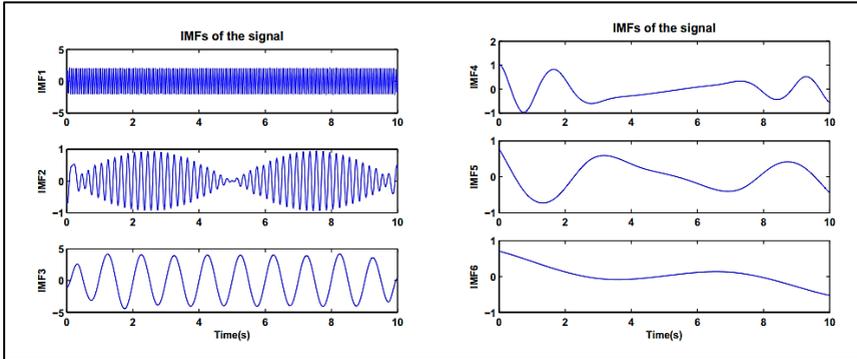
- 5) Pisahkan c_1 dari $x(t)$ dengan

$$r_1 = x(t) - c_1 \tag{2.61}$$

Dimana r_1 dianggap sebagai data asli, kemudian diulang lagi proses diatas hingga didapatkan komponen IMF ke dua c_2 hasil penurunan $x(t)$. Proses diatas dilakukan sebanyak n kali sampai IMF ke- n dari $x(t)$ telah didapatkan

- 6) Proses dekomposisi dapat dihentikan ketika r_n menjadi fungsi monotonik dimana tidak ada lagi IMF yang dapat dihasilkan. Akhirnya kita menemukan

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (2.62)$$



Gambar 2. 6 Komponen IMF dari Data *Time-Series*
(Chen dan Jegen-Kulcsar, 2007)

2.2 Penelitian Terdahulu

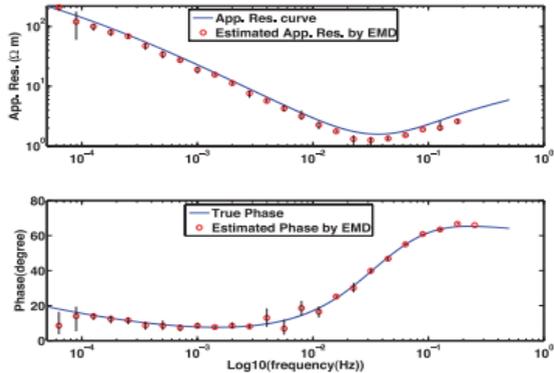
Penelitian dengan metode Magnetotelurik yang dilakukan di daerah padat aktivitas manusia pernah dilakukan oleh Lestari, dkk pada tahun 2018. Penelitian tersebut secara umum bertujuan untuk mendapatkan gambaran struktur geologi di daerah Jawa Timur yang berorientasi barat-timur dan utara-selatan. Secara khusus untuk memetakan zona patahan aktif Kendeng. Penelitian Magnetotelurik dilakukan dari utara ke selatan memotong pulau Jawa sepanjang 178 km dengan 12 titik pengukuran. Lintasan pengukuran melewati wilayah Gresik, Lamongan, Surabaya, Mojokerto, Jombang, Kediri, Blitar, dan Trenggalek.

Penelitian mengenai teknik pengolahan data Magnetotelurik untuk mengurangi efek *noise* yang terekam telah dilakukan sebelumnya. *Egbert* pada tahun 1986 mengajukan skema analisa *robust* otomatis pada pengolahan data geomagnetik yang menghitung penambahan sistematis dari *error* dengan penambahan *power*. Proses *robust* ini secara otomatis menurunkan bobot *outlier* data. Prosedur ini dikatakan menghitung fungsi transfer dengan *error* yang realistik.

Kazonubo Yamani dan Shinji Takasugi tahun 1997 melakukan penelitian mengenai pengolahan sounding data MT di wilayah Minami-Kayabe. Mereka melakukan proses *cascade decimation algorithm* pada data *time-series* dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas data. Metode ini merupakan algoritma perhitungan cepat dimana berbagai parameter MT dapat ditemukan dalam berbagai variasi kriteria cek koherensi. Dalam penelitiannya didapati bahwa metode ini dirasa kurang memuaskan karena jumlah *stack* yang ditemukan tidak mencukupi yang disebabkan oleh *noise* lokal yang tinggi dan waktu pengukuran yang terbatas.

Hikaru Nagata dkk pada tahun 2012 melakukan penelitian tentang pengolahan data MT dengan metode *maximum entropy* dan filter IIR (*Infinite impulse response*). Filter IIR yang digunakan adalah *pole on pedestal* dimana akan pada frekuensi spesifik. Filter ini digunakan pada data *time domain* dan menggunakan Transformasi Hilbert untuk menggantikan FFT dalam mengubah domain data ke domain frekuensi. Metode *maximum entropy (MEM)* digunakan untuk menghilangkan segmen yang terkontaminasi oleh *noise* yang besar. Ide yang mereka pakai ini dikatakan memberikan *response function (RFs)* yang lebih optimum jika dibanding dengan pengolahan data yang konvensional.

Penggunaan *filtering EMD* pada pengolahan data MT telah dimulai oleh Chen dan Jegen-Kulcsar pada tahun 2007. Mereka menggunakan EMD dan Transformasi *Hilbert* sebagai pengganti dari Transformasi *Fourier* baik pada data sintetik maupun data hasil pengukuran. Chen dkk melanjutkan penelitian tersebut pada tahun 2012 untuk pengolahan data MT laut. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan didapati jika resistivitas semu dan fase yang dihitung dari penurunan tensor impedansi hasil EMD secara umum lebih stabil dan hanya beberapa yang jelek ketika proses *robust*. Hasil tersebut menunjukkan jika EMD sangat potensial untuk mengendalikan data yang terpapar *noise*. Gambar 2.6 menggambarkan kurva resistivitas semu dan fase dari data sintetik yang membandingkan hasil dari proses transformasi *fourier* dengan hasil dari estimasi EMD.



Gambar 2. 7 Kurva Resistivitas Semu dan Fase data Sintetik; hasil perhitungan analitik (biru) dan estimasi EMD (merah) dengan sedikit *noise* (Chen dkk, 2012)

Jian-hua, 2016 melakukan penelitian tentang penghilangan *noise* pada data MT di daerah akuisisi padat industri dimana datanya terkontaminasi oleh sinyal *noise* buatan manusia. Jin-hua melakukan penghilangan *noise* menggunakan kombinasi dari EMD dengan *independent component analysis* (ICA). Data hasil *filtering* kemudian diproses ke domain frekuensi dan menghasilkan dua set fungsi transfer MT yang kemudian dihasilkan dengan data yang diolah dengan menggunakan EMD saja. Hasil penelitian menunjukkan metode ini menghasilkan kurva resistivitas semu dan fase yang lebih baik. Metode EMD-ICA ini menyediakan metode baru untuk *de-noising* data MT dalam keadaan *signal to ratio* yang rendah.

**HALAMAN INI
SEGAJA DIKOSONGKAN**

BAB III

METODE PENELITIAN

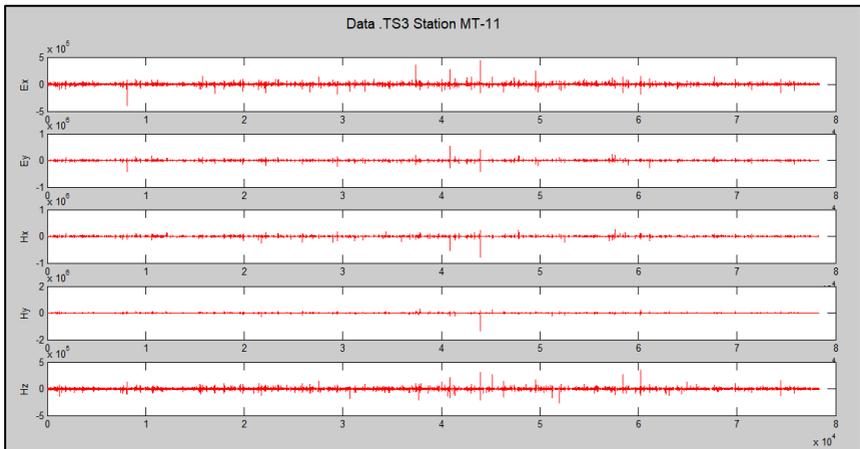
3.1 Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah pengolahan data dan analisis. Data yang digunakan adalah data sekunder berupa data *time-series* Magnetotelurik yang didapatkan dari Pusat Sumber Daya Mineral Batu Bara dan Panas Bumi (PSDMBP). Hasil dari pengolahan data ini kemudian dilakukan analisis sehingga diketahui pengaruh dari *filtering* dengan menggunakan *Empirical Mode Decomposition* pada pengolahan data Magnetotelurik.

3.2 Data dan Perangkat Lunak

3.2.1 Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa data *time-series* Magnetotelurik berekstensi .TS3 .TS4 dan.TS5. Masing masing data terdiri dari 5 komponen, yaitu E_x , E_y , H_x , H_y , dan H_z yang digambarkan seperti pada gambar 3.1. Untuk data berekstensi .TS3 memiliki sampling rate 2400 Hz, data .TS4 150 Hz, dan data .TS5 sebesar 15 Hz. Pada penelitian ini digunakan juga data kalibrasi dengan ekstensi .CLC dan .CLB, serta data .TBL yang berisi mengenai informasi lapangan saat akuisisi data MT.



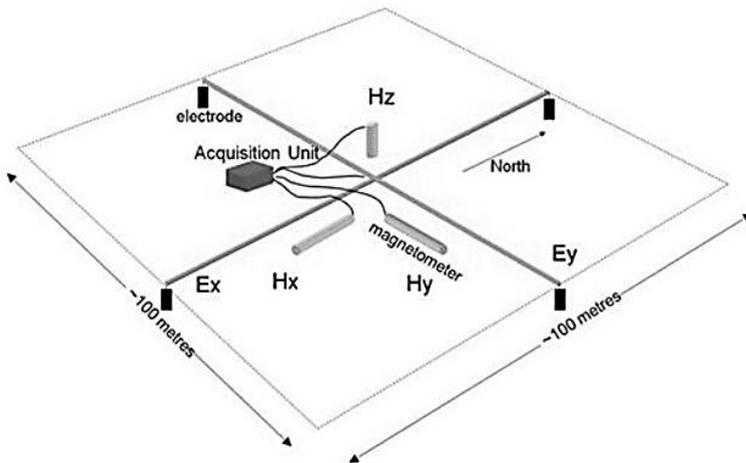
Gambar 3. 1 Kurva Timeseries Data .TS3 pada Station MT-11

Pada penelitian ini digunakan data sejumlah 5 titik pengukuran (*station*) yaitu titik MT-08, MT-11, MT-14, MT-15, dan MT-17 dengan rincian seperti dalam table 3.1.

Tabel 3. 1 Rincian Titik Penelitian

Stations	Elevasi (mdpl)
MT-08	686
MT-11	649
MT-14	633
MT-15	671
MT-17	703

Data Magnetotelurik pada penelitian ini merupakan data hasil pengukuran di Lapangan X yang merupakan salah satu lapangan panas bumi di Indonesia. Data diakuisisi dengan menggunakan perangkat *Phoenix*. Penampakkan desain akuisisi menggunakan perangkat *Phoenix* seperti pada gambar 3.2. Tiga buah *coil* magnetik digunakan untuk mendapatkan data Hx, Hy dan Hz. Empat buah *porouspot* dipasang membentang di arah utara – selatan untuk mendapatkan data Hx dan dipasang di arah barat – timur untuk mendapatkan data Hy.



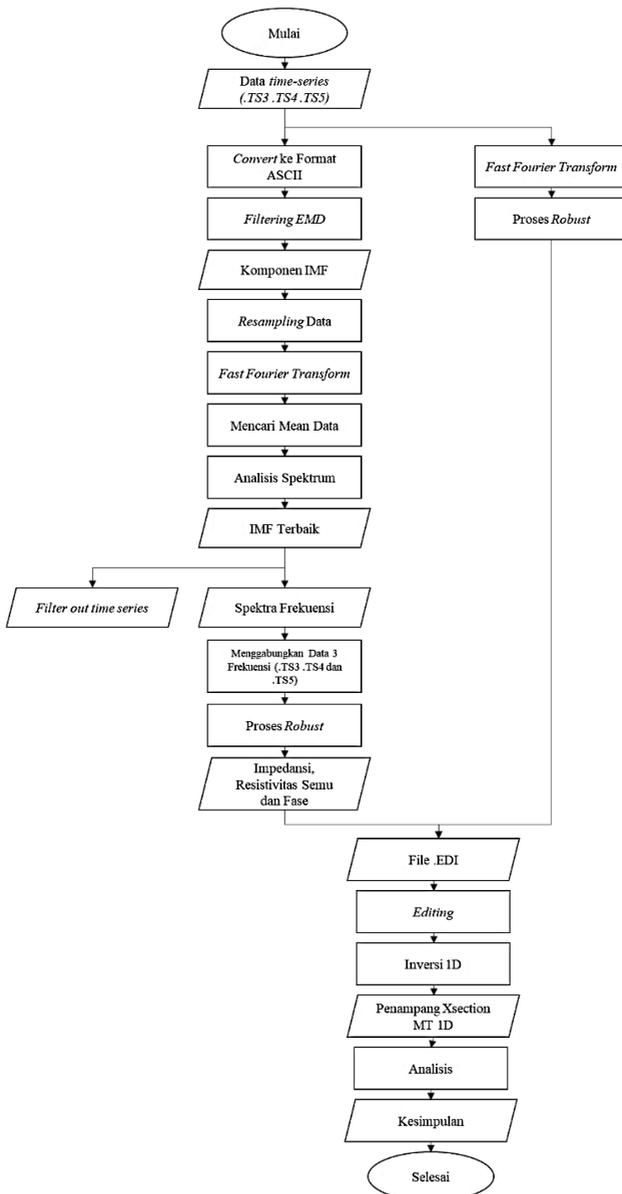
Gambar 3. 2 Layout Akuisisi Metode Magnetotelurik (Simpson dan Bahr, 2005)

3.2.2 Perangkat Lunak

Perangkat Lunak yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu: MATLAB yang digunakan untuk mengubah data *time-series* yang berekstensi biner menjadi ASCII, melakukan *filtering Empirical Mode Decomposition*, serta melakukan pengolahan data MT hingga didapatkan data .EDI. WinGlink untuk melakukan pemodelan inversi 1D. SSMT2000 dan MTEditor digunakan untuk mengolah data MT yang digunakan sebagai pembandingan hasil dari proses pengolahan data MT dengan *filtering* EMD menggunakan Matlab.

3.3 Langkah Kerja

Langkah kerja yang dilakukan didalam penelitian ini secara garis besar dibagi menjadi dua tahap, yaitu pengolahan data MT yang menggunakan *filtering* EMD dan yang tidak sebagai pembandingnya. Secara umum dibagi menjadi tiga tahap utama, pengolahan *time-series*, *main processing*, dan *modelling*. Perbedaan antara proses pengolahan data dengan menggunakan *filtering* EMD dan yang tidak terletak pada pengolahan data *time-series* sampai didapatkan data .EDI. Pada pengolahan data MT dengan *filtering* EMD dilakukan dengan *coding* di Matlab sedangkan pengolahan tanpa EMD dilakukan di software pengolahan data MT yang sudah ada. Selanjutnya proses adalah sama berupa Inversi-1D dengan menggunakan WinGlink., Langkah kerja tersebut digambarkan dalam gambar 3.3.

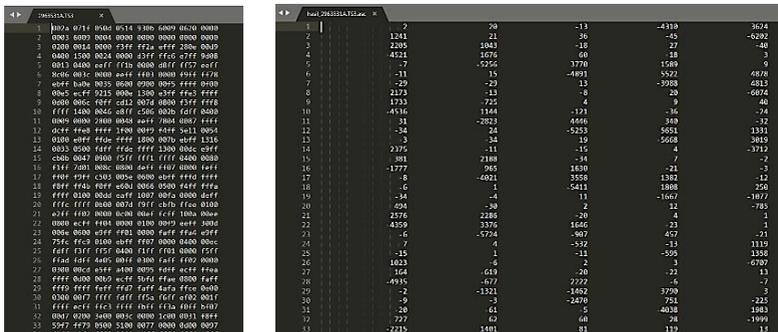


Gambar 3. 3 Diagram Pengolahan Data Magnetotelurik

3.3.1 Pengolahan Data Time Series

3.3.1.1 Ekspor Data

Data yang digunakan seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada bagian Data dan Perangkat Lunak memiliki ekstensi .TS3 .TS4 dan .TS5 yang memiliki format biner. Untuk bisa diolah ke *Matlab* maka data harus diubah formatnya ke format ASCII atau bentuk txt. Hasil *convert* berupa data 5 kolom berisi komponen secara berurutan: Ex Ey Hx Hy Hz seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Data MT dalam Format Biner (kiri) dan ASCII (kanan)

3.3.1.2 Filtering Empirical Mode Decomposition

Proses EMD seperti yang telah dijelaskan di dasar teori, dilakukan pada setiap komponen data MT (Ex, Ey, Hx, Hy, Hz) pada setiap *range* frekuensi data (.TS3 .TS4 dan .TS5) dari setiap titik penelitian. Proses ini dilakukan dengan *software Matlab* menggunakan fungsi sebagai berikut:

$$[imf,residual,info] = emd(X)$$

dimana X merupakan data *time series* MT. Hasil dari proses *filtering* EMD berupa dekomposisi sinyal yang terdiri atas sekumpulan IMF dan data residual. Jumlah IMF yang didapatkan diseragamkan sebanyak 10 komponen IMF. Dari 10 komponen IMF tersebut kemudian akan dilakukan analisa spektral untuk didapatkan komponen terbaik sebagai hasil dari proses *filtering* EMD yang kemudian akan digunakan dalam pengolahan data MT berikutnya.

3.3.1.3 Resampling Data

Merupakan proses membagi seluruh data domain waktu ke dalam sejumlah jendela (*windows*) dalam satuan waktu yang lebih kecil, sehingga didapatkan sebanyak n data/window. Waktu yang digunakan untuk *resampling*

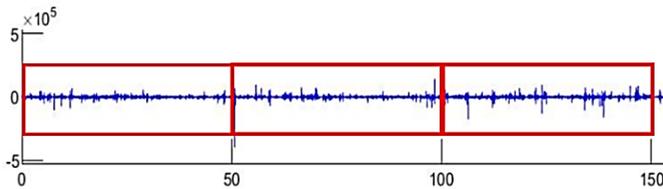
data berbeda-beda sesuai dengan frekuensi *sampling* data yang dirinci dalam tabel 3.1. Jumlah data per-komponen .TS di setiap titik berbeda beda tergantung lamanya akuisisi data. Dengan 3 frekuensi *sampling* (fs) yang berbeda untuk setiap titik pengukuran, maka jumlah data dibagi dengan fs didapatkan waktu total (Tmax) yang dilakukan dalam akuisisi data.

$$Tmax = \frac{n_{data}}{F_s}$$

Tabel 3. 2 Rincian Karakter Setiap Data untuk proses *Resampling*

Data	Fs (Hz)	Waktu(s)/window
.TS3	2400	2
.TS4	150	16
.TS5	15	240

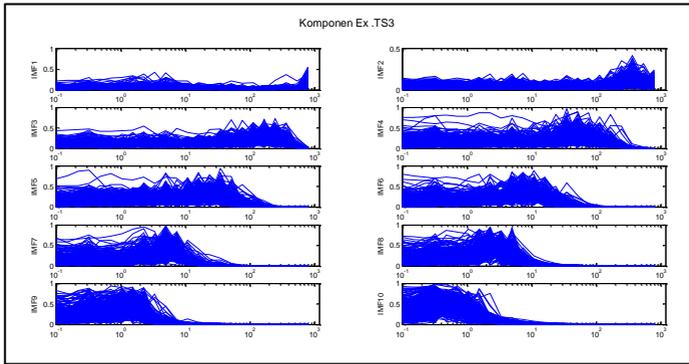
Fungsi dari tahap *resampling* data pada penelitian ini untuk membuat setiap data pengukuran seolah-olah dilakukan dalam beberapa kali pengulangan yang direpresentasikan dalam jumlah window. Tujuannya agar dapat dilakukan analisis lebih lanjut di pada spektrum sinyal dalam domain frekuensi di tahap selanjutnya.



Gambar 3. 5 Ilustrasi Proses *Resampling* Data Setiap 50 sekon

3.3.1.4 Fast Fourier Transform

Proses ini seperti yang dijelaskan di dasar teori digunakan untuk mengubah data dalam domain waktu ke dalam domain frekuensi. Data IMF yang sudah *iresampling* menjadi beberapa *windows* pada tahap sebelumnya kemudian masing-masing *window* di FFT dan diplotkan dalam satu plot untuk kemudian dianalisa spektrum frekuensinya seperti pada gambar 3.6.

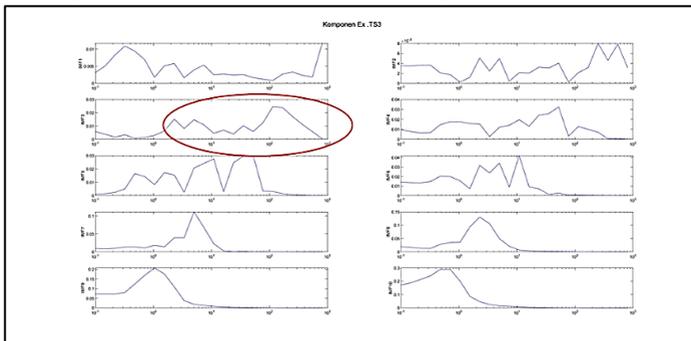


Gambar 3. 6 Hasil FFT Komponen Ex pada Data .TS3

Sekumpulan *window* yang didapatkan tadi kemudian dicari nilai rata-ratanya menggunakan fungsi *mean* pada *Matlab* sehingga didapatkan satu spektra domain frekuensi per IMF yang kemudian dianalisa untuk mendapatkan komponen IMF terbaik.

3.3.1.5 Analisis Spektral

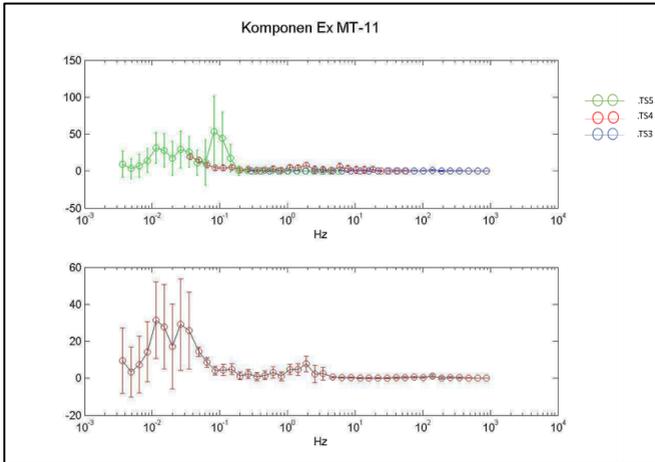
Proses ini digunakan untuk menentukan IMF mana yang paling representatif yang kemudian digunakan sebagai hasil filter EMD untuk setiap komponen data .TS. Analisa ini awalnya dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata dari sekumpulan spektral frekuensi untuk setiap IMF seperti pada gambar 3.7. Hasil rata-rata kemudian dianalisa, dimana spektrum terbaik dipilih sesuai dengan f_s dari setiap data .TS dan memiliki trend atau konsistensi. Misalkan untuk data .TS3 dengan f_s 2400 Hz atau frekuensi tinggi, maka dipilih spektrum yang memiliki bentuk gaussian yang mendekati frekuensi tinggi. Dan seterusnya untuk data .TS4 untuk frekuensi medium dan .TS5 untuk frekuensi rendah.



Gambar 3. 7 Spektrum Frekuensi Rata-rata pada Komponen Ex Data .TS3

3.3.1.6 Penggabungan 3 Data Frekuensi

Setelah didapatkan komponen IMF terbaik untuk setiap komponen (Ex Ey Hx Hy dan Hz) di setiap frekuensi *sampling*. Maka kemudian untuk setiap komponen digabungkan anatar 3 frekuensi *sampling* (.TS3 .TS4 dan .TS5) sehingga didapatkan spektrum frekuensi yang unth yang membentang dari frekuensi rendah ke frekuensi tinggi yang range frekuensinya berbeda beda tergantung lamanya waktu pengukuran (Gambar 3.8). Pada tahap ini akan ada data yang *overlap* atau saling tumpang tindih antar frekuensi *sampling* sehingga perlu diseleksi berdasarkan trend kurva.



Gambar 3. 8 Kurva Komponen Ex MT-11 Hasil Penggabungan 3 Data Frekuensi

3.3.2 Main Processing MT

3.3.2.1 Perhitungan Nilai Impedansi

Pada persamaan 2.37 komponen medan magnetic (H) diganti dengan fluks magnetic (B) dengan persamaan 2.5 sehingga persamaannya menjadi:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Dan dapat direpresentasikan dengan persamaan berikut:

$$E_x = Z_{xx}B_x + Z_{xy}B_y \quad (3.2)$$

$$E_y = Z_{yx}B_x + Z_{yy}B_y \quad (3.3)$$

Untuk mendapatkan nilai impedansi (Z) maka digunakan *cross and auto spectra* dengan mengalikan persamaan 3.2 dan 3.3 dengan konjugasi kompleks yang disimbolkan dengan (X*) dimana X adalah spektra elektrik dan magnetik. Dengan $\langle \rangle$ merupakan nilai rata-rata dari seluruh frekuensi, menggunakan kedelapan *cross power* antara E_x dan E_y dengan E_x E_y H_x dan H_y maka didapatkan persamaan:

$$Z_{xx} = \frac{\langle E_x B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle - \langle E_x B_y^* \rangle \langle B_y B_x^* \rangle}{\langle B_x B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle - |\langle B_x B_y^* \rangle|^2} \quad (3.4)$$

$$Z_{xy} = \frac{\langle E_x B_y^* \rangle \langle B_x B_x^* \rangle - \langle E_x B_x^* \rangle \langle B_x B_y^* \rangle}{\langle B_x B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle - |\langle B_x B_y^* \rangle|^2} \quad (3.5)$$

$$Z_{yx} = \frac{\langle E_y B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle - \langle E_y B_y^* \rangle \langle B_y B_x^* \rangle}{\langle B_x B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle - |\langle B_x B_y^* \rangle|^2} \quad (3.6)$$

$$Z_{yy} = \frac{\langle E_y B_y^* \rangle \langle B_x B_x^* \rangle - \langle E_y B_x^* \rangle \langle B_x B_y^* \rangle}{\langle B_x B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle - |\langle B_x B_y^* \rangle|^2} \quad (3.7)$$

3.3.2.2 Estimasi *Robust*

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian dasar teori, dimana proses *robust* merupakan proses penghilangan efek data *outliers* dengan memberikan bobot pada data. Penentuan bobot yang benar salah satunya dengan menentukan nilai koherensi antara 2 data *timeseries* yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$w_{ab} = \frac{|\langle a b^* \rangle|^2}{\langle a a^* \rangle \langle b b^* \rangle} \quad (3.8)$$

dimana a adalah komponen medan elektrik dan b adalah komponen medan magnetik. Namun dalam kondisi tertentu nilai koherensi dapat dipengaruhi oleh kehadiran sinyal ketiga yang didefinisikan sebagai c. Dalam situasi ini lebih baik menggunakan koherensi parsial dimana efek dari sinyal ketiga dihilangkan. Nilai bobot yang diberikan menjadi:

$$W_{ab} = \frac{w_{ab} - w_{ac}w_{cb}}{\sqrt{(1 - |w_{ac}|^2)(1 - |w_{cb}|^2)}} \quad (3.9)$$

Nilai bobot ini yang kemudian dimasukkan dalam persamaan 3.4 sampai 3.8 untuk mendapatkan nilai impedansi yang baru seperti pada contoh berikut:

$$Z_{xy,q} = \frac{(\langle E_x B_y^* \rangle \langle B_x B_x^* \rangle \cdot W_{xy}) - (\langle E_x B_x^* \rangle \langle B_x B_y^* \rangle \cdot W_{xy})}{(\langle B_x B_x^* \rangle \langle B_y B_y^* \rangle \cdot W_{xy}) - (|\langle B_x B_y^* \rangle|^2 \cdot W_{xy})} \quad (3.10)$$

Dan seterusnya untuk komponen impedansi yang lain, dengan hubungan a, b, dan c pada penentuan koherensi parsial adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Komponen dalam Menentukan Koherensi Parsial

Elemen Impedansi	Sinyal Input a	Sinyal Output b	Sinyal Ketiga c
Z_{xx}	E_x	B_x	B_y
Z_{xy}	E_x	B_y	B_x
Z_{yx}	E_y	B_x	B_y
Z_{yy}	E_y	B_y	B_x

Dihitung juga nilai error dari persebaran nilai impedansi, denhgan menggunakan *median estimator*. *Median estimator* impedansi dibagi menjadi komponen riil dan imajiner sebagai berikut:

$$R_{med}(Z_{xy}) = med_k(R(Z_{xy})) \quad (3.11)$$

$$I_{med}(Z_{xy}) = med_k(I(Z_{xy})) \quad (3.12)$$

Sehingga nilai errornya menjadi:

$$\delta Z_{xy}(R) = 1.483 \cdot med(|R(Z_{xy}) - R_{med}(Z_{xy})|) \quad (3.13)$$

$$\delta Z_{xy}(I) = 1.483 \cdot med(|I(Z_{xy}) - I_{med}(Z_{xy})|) \quad (3.14)$$

$$\delta Z_{xy} = \frac{1.96 \cdot \delta Z_{xy} \max}{\sqrt{n}} \quad (3.15)$$

dimana $\delta Z_{xy} \max$ nilai maksimum antara $\delta Z_{xy}(R)$ dan $\delta Z_{xy}(I)$.

3.3.2.3 Perhitungan Nilai Resistivitas Semu dan Fase

Perhitungan resistivitas semu dan fase sama seperti di bagian tinjauan pustaka yaitu pada persamaan 2.44 dan 2.45. Namun karena pada proses sebelumnya komponen H diganti dengan komponen B maka persamaan 2.44 berubah menjadi:

$$\rho_a = \frac{\mu}{\omega} |z^2| \quad (3.16)$$

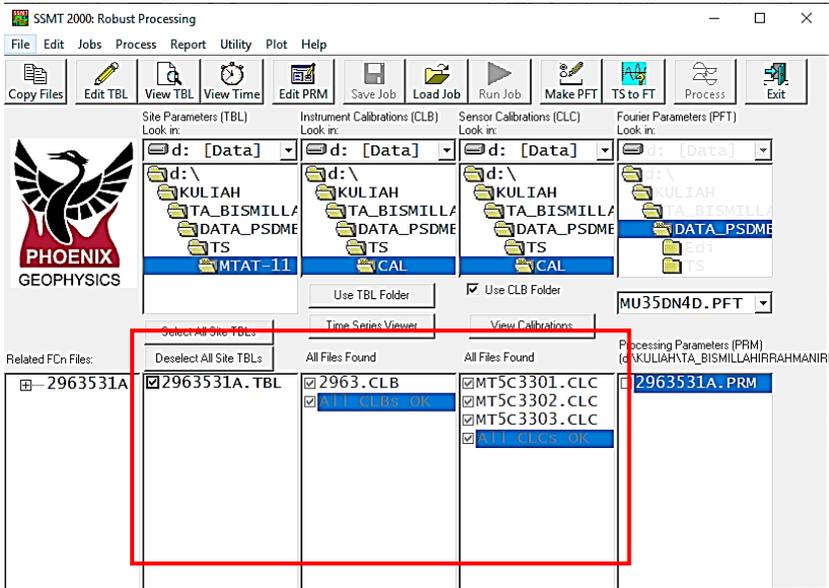
sedangkan untuk perhitungan fasenya masih tetap seperti persamaan 2.45. Komponen lain yang diperlukan untuk menyusun data .EDI adalah nilai error dari resistivitas semu dan fase yang dihitung dalam satuan logaritmik dengan persamaan berikut:

$$\delta(\log \rho_{xy}) = \frac{0.87}{|Z_{xy}|} \delta(Z_{xy}) \quad (3.17)$$

$$\delta(\phi_{xy}) = \frac{0.71}{|Z_{xy}|} \delta(Z_{xy}) \quad (3.18)$$

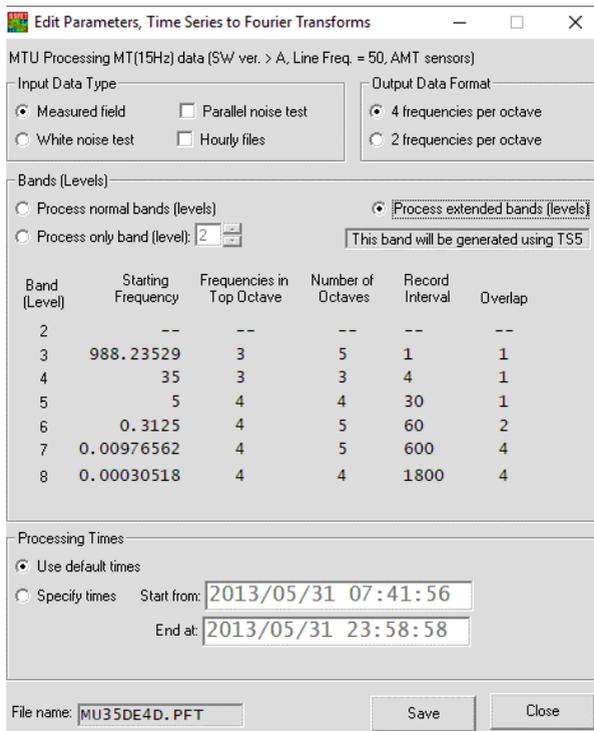
3.3.3 Pengolahan Data Menggunakan SSMT2000 dan MT-Editor

Pengolahan data tanpa menggunakan proses *filtering* EMD dilakukan sebagai pembanding hasil akhirnya nanti yang berupa penampang persebaran resistivitas bawah permukaan dalam model inversi 1D. Proses pengolahan data dilakukan dalam *software* pengolahan data yang disediakan oleh *phoenix* yaitu SSMT2000 dan MT-Editor. Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan *input* data berupa data .TBL dan data kalibrasi alat dengan ekstensi .CLB dan .CLC seperti pada gambar 3.9. Data medan magnet dan medan listrik dalam bentuk *timeseries* dengan ekstensi .TS3 .TS4 dan .TS5 otomatis terinput bersama data informasi lapangan (.TBL).



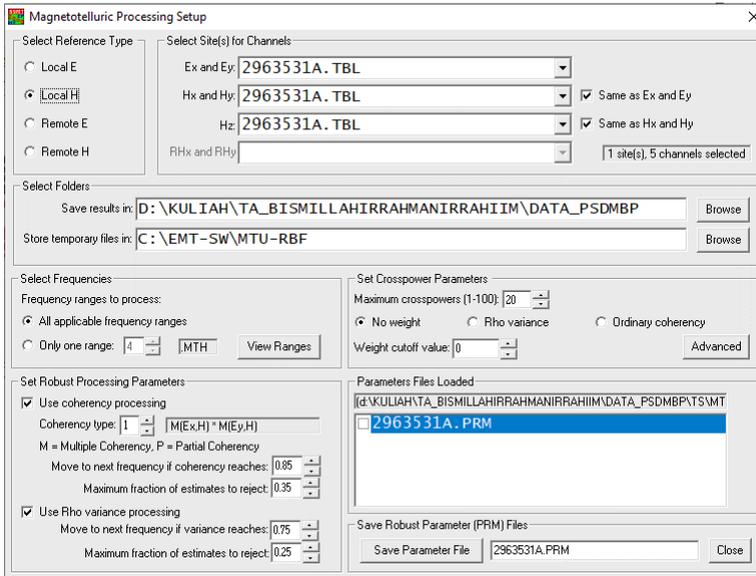
Gambar 3. 9 Tampilan *Input Data* pada SSMT2000

Setelah data *terinput* maka akan dilakukan konversi data dari domain waktu ke domain frekuensi. Langkah yang dilakukan adalah membuat parameter *time series to fourier transform* dengan menu “*Make PFT*” yang tampilannya seperti pada gambar 3.10. Pada proses tersebut rentang waktu yang akan diolah adalah seluruh waktu akuisisi yang lamanya beda-beda antar titik pengukuran di rentang 16 jam. Dipilih jenis data adalah data pengukuran atau *measured field* dan pada *Bands* dipilih *process extended bands* untuk memperoleh rentang frekuensi rendah yang didapat dari data .TS5. Spesifikasi waktu yang digunakan tidak diubah karena seluruh data waktu pengukuran digunakan dalam penelitian ini. Kemudian parameter FFT disimpan di diklik tombol TS to FT untuk memulai proses FFT.



Gambar 3. 10 Tampilan Pengaturan Parameter FFT

Langkah selanjutnya adalah membuat parameter *robust processing*. Proses *robust* pada dasarnya mirip dengan proses inversi *least – square* dimana akan diminimalisir pengaruh outlier terhadap pola data magnetotelurik dengan pemberian bobot pada data. Menu yang dipilih adalah “*Edit PRM*” dengan tampilan pengaturan parameter *robust* seperti pada gambar 3.11. Pada gambar tersebut nilai koherensi maksimum yang digunakan adalah 0.85 yang berarti koherensi antara medan magnet dan medan listrik pada suatu frekuensi pada data jika sudah mencapai nilai tersebut akan dilanjutkan ke frekuensi selanjutnya. Koherensi merupakan nilai dari pola data pengukuran magnetotelurik, apabila menunjukkan perubahan pola yang kontinyu maka diasumsikan memiliki tingkat kekoherenitas yang bagus.



Gambar 3. 11 Tampilan Pengaturan Parameter Proses *Robust*

Parameter pembobotan yang digunakan adalah *No Weight (NW)* dimana nilai bobot yang diberikan adalah sama rata ke semua data. Sedangkan parameter *crosspower* diatur di *default* yaitu maksimum di 20. Hal ini karena ditahap selanjutnya tidak dilakukan proses seleksi *crosspower* agar sama dengan proses pengolahan data dengan *filtering EMD* yang dilakukan di *Matlab*. Setelah itu maka parameter *robust* disimpan dan diklik menu “*process*” untuk memulai proses robust. Pada proses ini dihitung juga parameter-parameter pengolahan data MT seperti impedansi, resistivitas semu, dan fase. Setelah proses ini selesai hasil datanya adalah data frekuensi tinggi (.MTH) dan data frekuensi rendah (.MTL) dimana data ini digunakan sebagai *input* di MT Editor untuk kemudian dikonversi ke data berformat .EDI.

3.3.4 Modelling

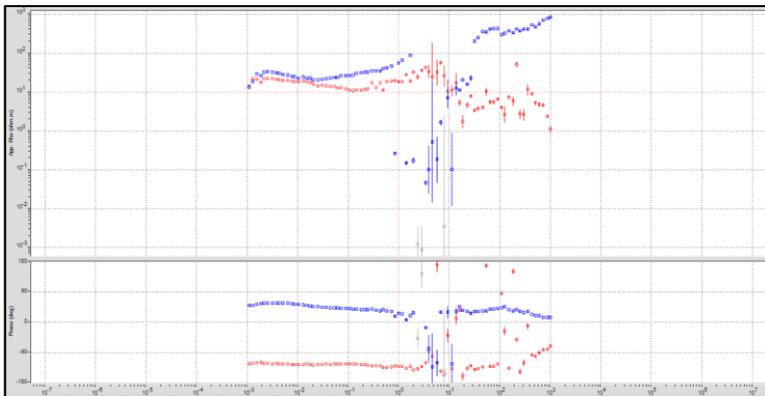
3.3.3.1 Editing

Data hasil pengolahan data utama MT berupa data berekstensi .EDI yang komponen penyusunnya adalah; frekuensi, ρ_{xy} , ρ_{yx} , $\delta(\log \rho_{xy})$, $\delta(\log \rho_{yx})$, ϕ_{xy} , ϕ_{yx} , $\delta(\phi_{xy})$ dan $\delta(\phi_{yx})$. Pengolahan kemudian dilanjutkan di WinGlink untuk melakukan pemodelan inversi 1D. Tahap pertama yang dilakukan adalah proses *editing*. Proses ini meliputi *masking* data yaitu

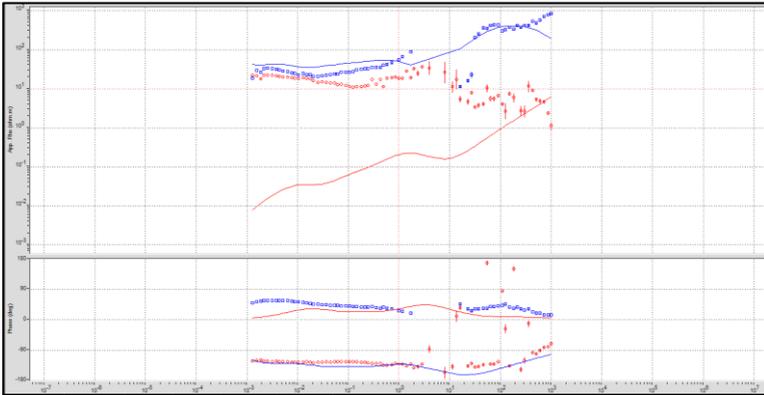
menghilangkan titik TE/TM pada kurva *rho apparent* maupun fase di frekuensi tertentu yang dianggap sebagai outlier. Dan proses penghalusan data (*smoothing*) untuk mendapatkan kurva persebaran data TE/TM yang lebih halus. Proses penghalusan data ada beberapa opsi yang dapat digunakan seperti D+, numerical, dan Sutarno. Pada penelitian ini digunakan *smoothing* D+ dan numerical saja berdasarkan adanya kesesuaian kurva yang didapatkan. Proses yang sama juga dilakukan untuk data hasil pengolahan tanpa proses *filtering* EMD.

Smoothing D+ adalah proses penghalusan kurva data magnetotelurik yang mempertimbangkan pola kurva *rho apparent* terhadap pola kurva derajat fase. Proses ini juga melibatkan parameter *error bar* sebagai dasar dalam proses penghalusan pola kurva baik pada kurva *rho apparent* maupun pada kurva derajat fasenya. Semakin besar *error barnya* maka hasil *smoothing*nya akan menghasilkan kurva *smoothing* yang semakin menjauhi dari pola kurva data observasi.

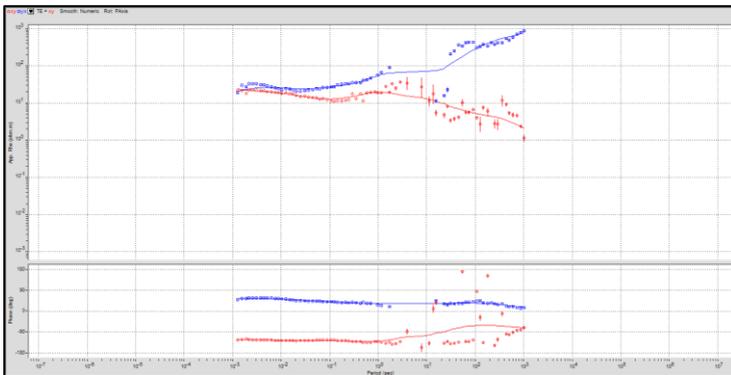
Sedangkan untuk *smoothing numerical* merupakan proses penghalusan data berdasarkan pola kurva observasi. Apabila data yang diperoleh memiliki pola yang acak maka *smoothing* ini akan membentuk kurva *smoothing* yang acak juga, sehingga tidak direkomendasikan dalam melakukan proses penghalusan data, kecuali data pengukuran yang diperoleh memang dalam kondisi yang sangat bagus. Selain itu pada *smoothing numerical* ini menggunakan pendekatan secara *numeric* pada setiap pola kurvanya. Pendekatan tersebut berupa persamaan polinomial dengan nilai *orde* tertentu.



Gambar 3. 12 Kurva Data MT-11 Sebelum *Editing*



Gambar 3. 13 Kurva Data MT-11 Setelah *Editing* dengan *Smoothing D+*

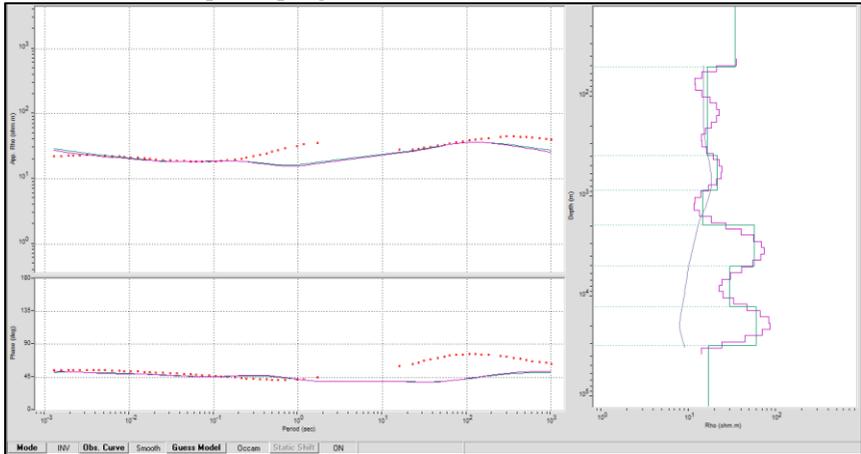


Gambar 3. 14 Kurva Data MT-11 Setelah *Editing* dengan *Smoothing Numerical*

3.3.3.2 *Inversi 1D*

Tujuan dari dilakukannya proses inversi ini adalah untuk mendapatkan parameter resistivitas perhitungan (*true resistivity*) dan kedalaman untuk kemudian bisa dimodelkan persebaran resistivitas bawah permukaannya. Pada penelitian ini inversi dilakukan hanya sampai inversi 1D dengan menggunakan *software WinGlink*. Opsi inversi 1D yang adalah inversi *Bostick* dan *Occam*, namun penulis hanya menggunakan inversi *Occam* karena dirasa memiliki hasil kurva yang lebih *smooth* dan mendekati kurva hasil observasi. Prinsip dalam proses inversi 1D ini adalah mencocokkan kurva model dengan kurva hasil inversi *occam* yang bias diatur baik dari sisi kedalaman maupun nilai *true*

resistivitasnya sehingga kurva ρ apparent dan fase yang disebelah kiri tampilan (Gambar 3.12) juga berimpitan antara kurva model dan hasil inversinya. Kurva input (ρ apparent dan fase) yang digunakan merupakan kurva *Invariant* yang merupakan rata-rata antara mode TE dan TM. Hasil inversi kemudian dimodelkan dalam penampang *cross-section 1D*.



Gambar 3. 15 Tampilan Inversi 1D Data MT-11; tampilan kiri merupakan kurva data observasi berupa ρ apparent dan fase (*input*), tampilan kanan merupakan kurva hasil inversi (*output*)

**HALAMAN INI
SEGAJA DIKOSONGKAN**

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

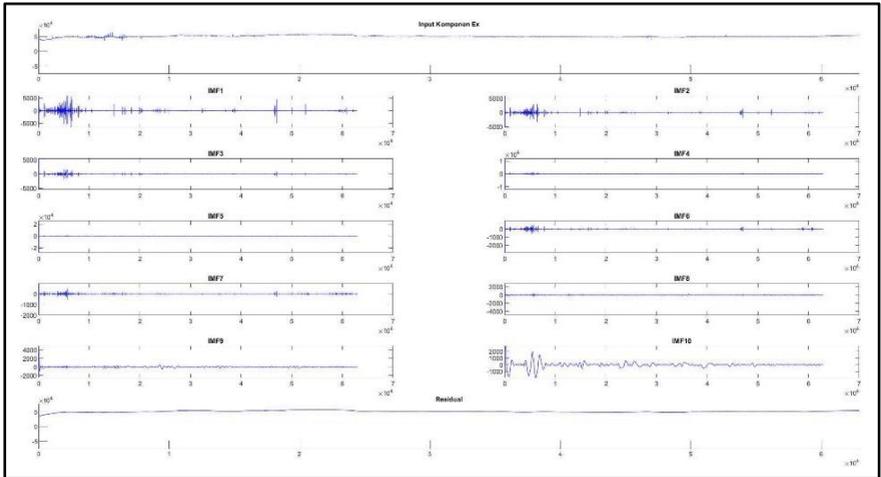
4.1 Hasil Pengolahan Data *Time Series* dengan Filter EMD

Data input yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang sudah dijelaskan dalam bab sebelumnya, yaitu sebanyak 5 titik pengukuran. Meliputi titik MT-08, MT-11, MT-14, MT-15, dan MT-17 yang masing masing terbagi menjadi 3 data *sampling* frekuensi yaitu di frekuensi 2400 Hz (.TS3), 150 Hz (.TS4) dan 15 Hz (.TS5). Dari data input yang berformat biner tersebut diubah ke format ASCII dan diolah di Matlab. Setiap titik pengukuran memiliki jumlah data yang berbeda-beda dikarenakan waktu pengukuran yang berbeda-beda pula. Waktu pengukuran yang dilakukan dapat diketahui dengan membagi jumlah data per *sampling* frekuensi dengan frekuensi *sampling*nya dengan rincian hasil seperti pada table 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik Data *Input*

<i>Stations</i>	Data	Fs (Hz)	n Data	Tmax (s)
MT-08	TS3	2400	1185600	494
	TS4	150	590400	3936
	TS5	15	887400	59160
	Total			63590
MT-11	TS3	2400	1176000	490
	TS4	150	585600	3904
	TS5	15	879345	58623
	Total			63017
MT-14	TS3	2400	1132800	472
	TS4	150	566400	3776
	TS5	15	548895	56593
	Total			60841
MT-15	TS3	2400	1171200	488
	TS4	150	583200	3888
	TS5	15	876600	58440
	Total			62816
MT-17	TS3	2400	1185600	494
	TS4	150	590400	3936
	TS5	15	887400	59160
	Total			63590

Dari table 4.1 diketahui waktu pengukuran di kelima titik berada di kisaran 17 jam. Data input atau sinyal input per frekuensi sampling pada setiap titik pengukuran kemudian dilakukan dekomposisi menggunakan *Empirical Mode Decomposition (EMD)*. Proses ini pada prinsipnya mendekomposisi sinyal domain waktu ke sekumpulan mode intrinsik yang disebut sebagai *Intrinsic Mode Function (IMF)*. Sekumpulan IMF ini bisa dikatakan sebagai ekspansi dari sinyal awal. Pada penelitian ini jumlah IMF pada setiap data input disamakan menjadi sejumlah 10 IMF agar mudah dalam analisisnya nanti. Hasil dari proses EMD ini adalah 10 IMF dan 1 sinyal residual seperti pada gambar 4.1. Dari gambar tersebut dapat diketahui jika sifat data atau sinyal hasil dekomposisi EMD adalah semakin tinggi angka IMFnya maka amplitudo sinyalnya semakin mengecil seiring karakteristik dari sinyal awalnya yang semakin menghilang. Sinyal IMF hasil dekomposisi juga bersifat stasioner di sumbu 0 jika dibanding dengan sinyal *inputnya*. Sifat non-stasioneritas pada data *input* ini bisa mengidentifikasi adanya gangguan saat perambatan gelombang EM atau keberadaan *noise* yang ikut terekam saat akuisisi data MT. Sifat inilah yang harus diatasi karena pada proses pengolahan berikutnya yaitu transformasi *fourier* dirancang hanya untuk mengolah sinyal *time-series* yang bersifat stasioner saja. Sehingga jika sifat non-stasioneritas ini tidak diatasi dapat menyebabkan kesalahan informasi dari hasil pengolahan yang akan didapatkan. Dari kesepuluh IMF tadi akan dipilih satu yang akan menjadi hasil *filtering EMD* dengan melakukan analisis spektrum yang diubah ke domain frekuensi terlebih dahulu menggunakan proses transformasi *fourier*.

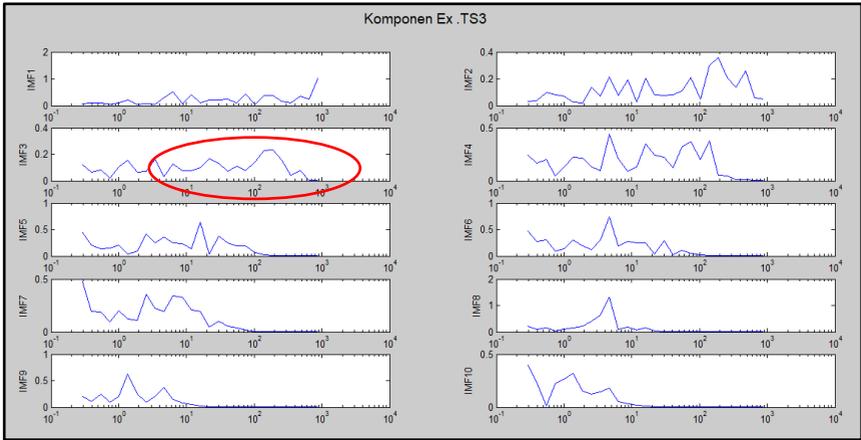


Gambar 4. 1 Hasil Proses EMD pada Komponen Ex Data TS5 MT-08

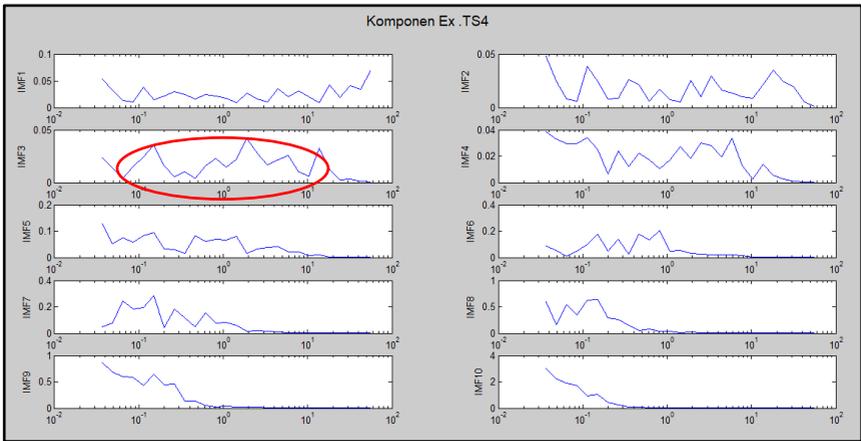
Sinyal hasil dekomposisi dengan proses EMD yang disebut sebagai IMF memiliki beberapa kekurangan seperti adanya efek ujung sinyal atau disebut sebagai *end effect* pada simpul atas maupun simpul bawah. Hal ini disebabkan karena pada setiap sinyal di setiap ujungnya hanya ada 1 maksima lokal atau minima lokal sehingga simpul yang dibuat dengan prinsip interpolasi *spline* dirasa kurang bias dipercaya karena dibuat berdasarkan trend data. Kekurangan lain dari EMD ada pada prosesnya dimana kriteria *stopping* iterasi dalam menentukan hasil dekomposisi sebagai IMF atau bukan belum ada patokan pastinya. Dalam penelitian ini, kriteria *stopping* iterasi yaitu pada standar deviasi (SD) $\leq 0,2 - 0,3$. Selain itu kekurangan proses EMD ini adalah kecepatan perhitungannya yang cukup lama jika diteapkan pada data MT yang besar dan merepresentasikan pengukuran yang berlangsung > 12 jam.

Setelah semua komponen dari semua data frekuensi *sampling* di kelima titik dilakukan proses EMD, kemudian data dilakukan proses *resampling*. Dari total waktu pengukuran yang telah dihitung di table 4.1 kemudian data dipotong-potong atau dicacah lagi per berapa sekon sesuai dengan table 3.1 di sub bab langkah kerja, menjadi sekumpulan jendela (*windows*). Tujuan dari proses ini untuk menciptakan *sample* data yang seolah-olah didapatkan dari pengukuran data MT yang berulang. Dengan banyaknya *sample* data ini maka bisa

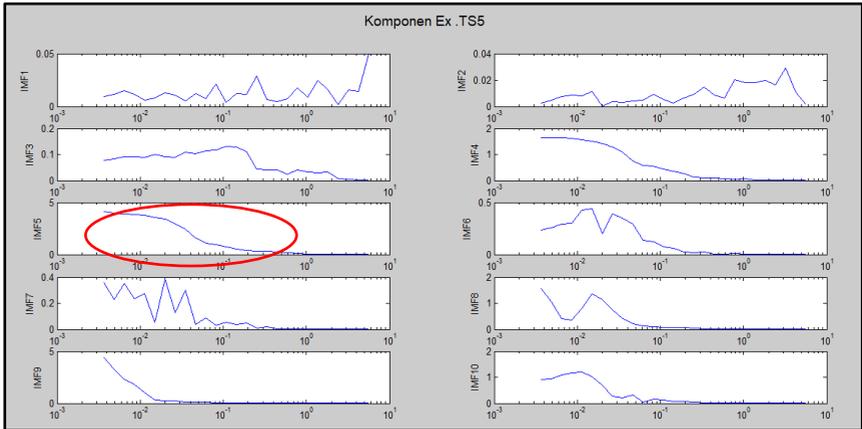
didapatkan persebaran data yang akan berguna di proses berikutnya seperti dalam mendapatkan nilai *error* dari resistivitas semu dan fase.



Gambar 4. 2 Spektrum Hasil Rata-Rata pada Komponen Ex Data .TS3 (frekuensi tinggi) MT-08



Gambar 4. 3 Spektrum Hasil Rata-Rata pada Komponen Ex Data .TS4 (frekuensi menengah) MT-08



Gambar 4. 4 Spektrum Hasil Rata-Rata pada Komponen Ex Data .TS4 (frekuensi rendah) MT-08

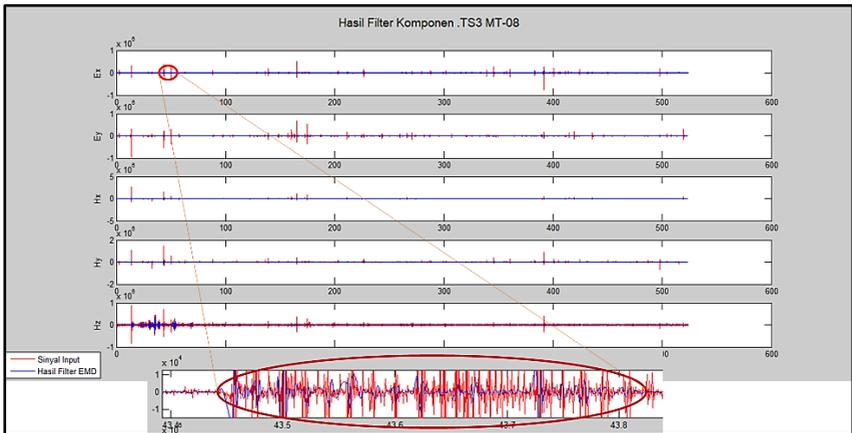
Data yang sudah *diresampling* menjadi sekumpulan *windows* tadi kemudian dilakukan proses FFT untuk mengubah domain dari domain waktu ke frekuensi. Dari sekumpulan spektrum hasil FFT di setiap IMF kemudian dicari nilai rata-ratanya, sehingga didapatkan satu spektrum frekuensi dari setiap IMF. Dari sini maka akan dilakukan analisis spektrum untuk memilih IMF mana yang kemudian akan menjadi hasil *filter EMD* dan spektrum frekuensinya akan dipakai untuk proses pengolahan selanjutnya. Dalam pemilihan spektrum terbaik, belum ada referensi pasti yang bisa dirujuk dalam pelaksanaannya. Namun disini penulis memilih berdasarkan bentuk *gaussian* dari kurva spektrum, yaitu ketika amplitudo kurva spektrum besar pada *range* frekuensi tertentu. Diketahui jika data awal per titik pengukuran memiliki 3 frekuensi sampling, yaitu data .TS3 pada frekuensi tinggi .TS4 pada frekuensi menengah, dan .TS5 pada frekuensi rendah. 3 variasi frekuensi sampling inilah yang menjadi dasar pemilihan kurva spektrum terbaik. Seperti pada gambar 4.2 sampai 4.4 yang merupakan contoh pemilihan spektrum frekuensi pada komponen Ex di titik MT-08. Pada data .TS3 dengan frekuensi tinggi dipilih spektrum yang kurva gaussiannya berada diatas frekuensi 10^1 Hz. Pada data .TS4 dengan frekuensi sampling di *range medium*, maka dipilih kurva yang bentuk gaussiannya berada di antara $10^{-1} - 10^1$ Hz. Begitu pula pada data .TS5 dengan frekuensi sampling yang rendah, maka dipilih spektrum yang bentuk kurva gaussiannya dibawah 10^{-1} Hz. Untuk data lain hasil pemilihan spektrum terbaik dicantumkan dalam table 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Analisis Spektrum

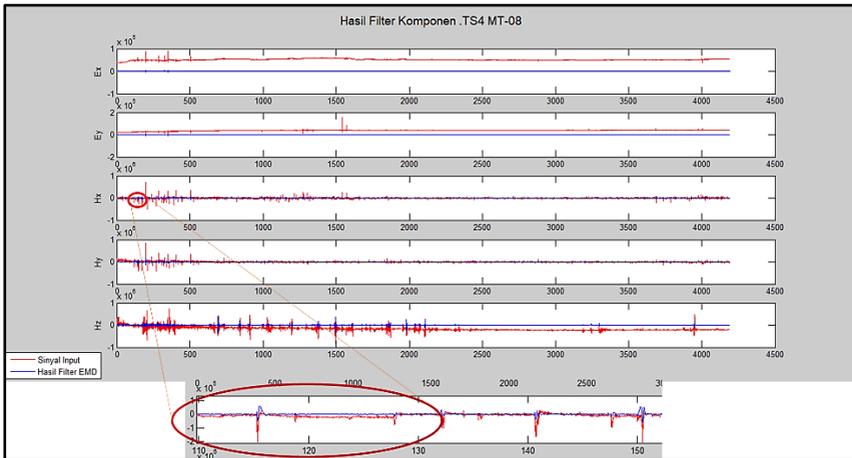
Stations	Komponen	Data	IMF ke-	Stations	Komponen	Data	IMF ke-	Stations	Komponen	Data	IMF ke-
MT-08	Ex	TS3	3	MT-14	Ex	TS3	3	MT-17	Ex	TS3	4
		TS4	3			TS4	3			TS4	3
		TS5	5			TS5	3			TS5	6
	Ey	TS3	3		Ey	TS3	3		Ey	TS3	4
		TS4	3			TS4	3			TS4	3
		TS5	5			TS5	3			TS5	6
	Hx	TS3	3		Hx	TS3	3		Hx	TS3	4
		TS4	3			TS4	3			TS4	3
		TS5	5			TS5	3			TS5	6
	Hy	TS3	3		Hy	TS3	3		Hy	TS3	4
		TS4	3			TS4	3			TS4	3
		TS5	5			TS5	3			TS5	6
	Hz	TS3	3		Hz	TS3	3		Hz	TS3	4
		TS4	3			TS4	3			TS4	3
		TS5	5			TS5	3			TS5	6
MT-11	Ex	TS3	3	MT-15	Ex	TS3	3				
		TS4	3			TS4	3				
		TS5	6			TS5	5				
	Ey	TS3	3		Ey	TS3	3				
		TS4	3			TS4	3				
		TS5	6			TS5	5				
	Hx	TS3	3		Hx	TS3	3				
		TS4	3			TS4	3				
		TS5	6			TS5	5				
	Hy	TS3	3		Hy	TS3	3				
		TS4	3			TS4	3				
		TS5	6			TS5	5				
	Hz	TS3	3		Hz	TS3	3				
		TS4	3			TS4	3				
		TS5	6			TS5	5				

Hasil dari analisa spektrum yang telah dilakukan adalah IMF terbaik dari setiap komponen data. Maka data *time series* dari IMF tersebut merupakan hasil *filtering EMD*, sedangkan sekumpulan spektrum dalam domain frekuensi sebelum di rata-rata merupakan data yang akan digunakan di tahap selanjutnya. IMF terpilih dalam domain waktu kemudian dibandingkan dengan data input untuk mengetahui perbedaan setelah dilakukan *filtering EMD* dengan tampilan hasil seperti pada gambar 4.5 sampai 4.7. Gambar pada contoh tersebut merupakan data pada titik MT-08. Dari gambar tersebut kurva merah merupakan sinyal input dan kurva biru merupakan sinyal hasil *filter EMD*. Dari hasil perbesaran (*zoom*) dapat diketahui jika sinyal hasil *filtering EMD* memiliki karakter yang lebih halus (*smooth*) jika dibanding dengan kurva sinyal input yang bersifat lebih *spiky* atau bergelombang tajam. Sinyal hasil filter juga lebih bersifat stasioner di titik 0 dibanding sinyal input yang cenderung memiliki trend menjauh dari titik stasioner (titik 0) seperti pada komponen Ex dan Ey di gambar 4.6 dan gambar 4.7. Telah dijelaskan di bagian pendahuluan, jika sifat non-stasioneritas pada sinyal bisa disebabkan oleh adanya gangguan pada

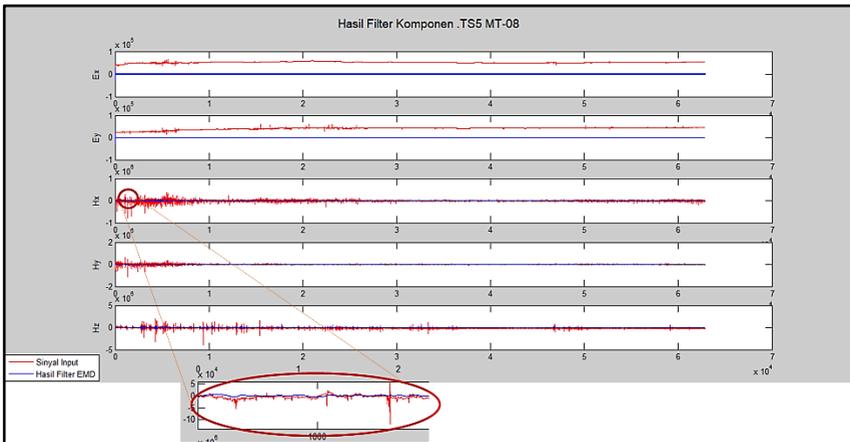
perambatan sinyal EM atau adanya *noise* yang ikut terekam. Dari hasil *filtering time series* ini diketahui jika dengan proses EMD dapat dihasilkan sinyal yang bersifat lebih halus dan stasioner. Hasil filtering EMD untuk titik lain dilampirkan dalam lampiran.



Gambar 4. 5 Kurva *Time Series* Hasil *Filtering EMD* pada Data .TS3 MT-08



Gambar 4. 6 Kurva *Time Series* Hasil *Filtering EMD* pada Data .TS4 MT-08



Gambar 4. 7 Kurva *Time Series* Hasil *Filtering EMD* pada Data .TS5 MT-08

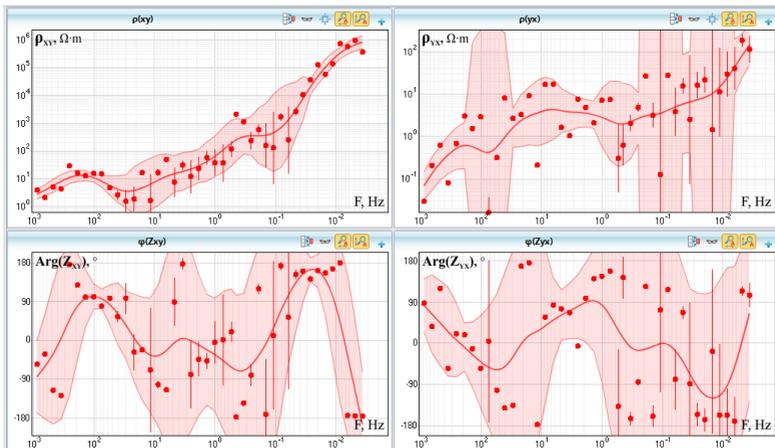
Data *time series* hasil *filtering EMD* ini pada awalnya akan diolah kembali secara normal menggunakan software pengolahan data MT dari *phoenix* yaitu SSMT2000 dan MTEditor. Namun masih ada kendala berupa belum adanya *software* untuk mengembalikan data berformat ASCII kembali ke format biner dari perangkat akuisisi MT *phoenix* dengan ekstensi .TS3 .TS4 dan .TS5. Maka dari itu dalam penelitian ini penulis membuat *coding* pengolahan data MT berbasis Matlab dengan rumus perhitungan seperti yang telah dijelaskan di bab sebelumnya. Data berupa sekumpulan spektrum frekuensi dari IMF yang terbaik dalam 3 frekuensi *sampling* yang berbeda kemudian *dimerge* atau disatukan menjadi satu spektrum yang utuh yang mencakup frekuensi rendah sampai frekuensi tinggi. Hasil penggabungan 3 spektrum frekuensi seperti pada gambar 3.8 ini yang kemudian digunakan sebagai input di *main processing* MT. Diawali dengan proses *robust* untuk mendapatkan komponen tensor impedansi yaitu Z_{xy} dan Z_{yx} dengan langkah seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab Langkah Kerja. Dari nilai impedansi tersebut kemudian bisa dihitung nilai ρ_{xy} , ρ_{yx} , ϕ_{xy} , dan ϕ_{yx} . Hasil kurva resistivitas semu dan fase akan dijelaskan di sub bab selanjutnya yang akan dibandingkan dengan kurva data hasil pengolahan tanpa *filtering EMD* yang dilakukan di *software* SSMT2000.

4.2 Kurva Resistivitas Semu dan Fase

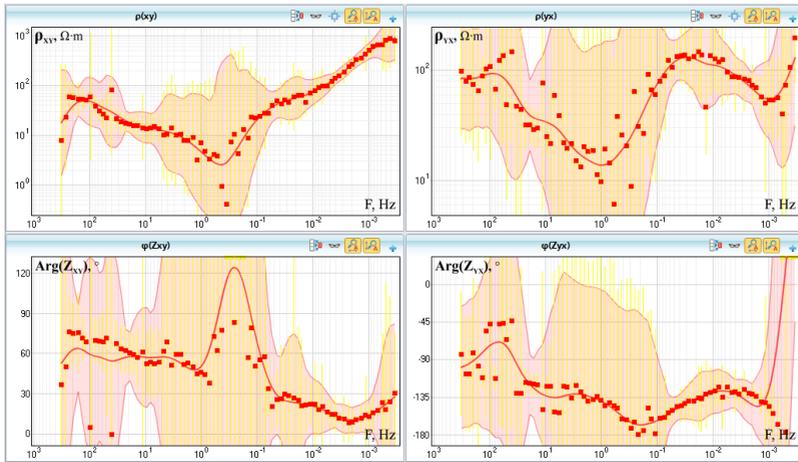
Hasil pengolahan data MT pada tahap *main processing* berupa kurva resistivitas semu (ρ) dan fase (ϕ). Nilai pada kurva resistivitas semu tidak menggambarkan resistivitas yang sebenarnya namun menunjukkan pola

persebaran resistivitas semu yang merupakan respon dari perambatan gelombang EM di bawah permukaan bumi. Nilai resistivitas semu berubah terhadap frekuensi alami gelombang EM di bumi yang tergambarkan dalam bentuk kurva *non linier*. Kurva resistivitas semu disajikan dalam 2 bentuk yaitu kurva XY dan kurva YX. Kurva XY disebut juga mode TE (*Transverse Electric*) yang menggambarkan persebaran resistivitas semu secara vertikal ke bawah permukaan bumi. Kurva YX disebut juga mode TM (*Transverse Magnetic*) yang menggambarkan persebaran resistivitas semu secara lateral.

Nilai pada kurva fase menunjukkan derajat perambatan gelombang EM di bawah permukaan bumi. Sama seperti kurva resistivitas semu, kurva derajat fase ditampilkan dalam dua mode yaitu XY (TE) dan YX (TM). Kurva fase mode TE menunjukkan derajat perambatan gelombang EM secara vertikal sedangkan kurva fase TM menunjukkan derajat perambatan gelombang EM secara lateral. Hasil kurva resistivitas semu dan fase dari pengolahan data MT dengan menggunakan *filtering EMD* adalah sebagai berikut yang kemudian dibandingkan dengan kurva resistivitas semu dan fase hasil pengolahan tanpa *filtering EMD* yang dilakukan di *software SSMT2000*.



Gambar 4. 8 Kurva Resistivitas Semu (Atas) dan Kurva Fase (Bawah) pada Titik MT-08 Hasil Pengolahan Data dengan Filtering EMD Berbasis MATLAB



Gambar 4. 9 Kurva Resistivitas Semu (Atas) dan Kurva Fase (Bawah) pada Titik MT-08 Hasil Pengolahan Data tanpa Filtering EMD di SSMT2000

Gambar 4.8 dan 4.9 merupakan kurva resistivitas semu dan fase hasil pengolahan data MT pada titik MT-08. Dari setiap gambar terdapat 4 kurva, dimana dari kiri ke kanan mulai dari atas adalah kurva resistivitas semu mode TE dan TM dan kebawah adalah kurva derajat fase TE dan TM. Bagian yang berwarna merah muda transparan pada gambar 4.8 dan berwarna oranye di gambar 4.9 menggambarkan *error bar* dari persebaran nilai resistivitas semu dan fase. Sedangkan garis tegas pada gambar merupakan kurva *smoothing spline*. Dari gambar diketahui hal pertama yang sangat berbeda adalah jumlah data atau sampling frekuensi per *decades*. Pada kurva hasil pengolahan dengan *filtering EMD* berbasis MATLAB didapati sejumlah 8 frekuensi per *decades*, sedangkan pada hasil pengolahan tanpa *filtering EMD* dengan SSMT2000 sejumlah 14 frekuensi per *decades*. Hal kedua adalah range *nilai* persebaran datanya. Pada gambar 4.8 didapati kurva resistivitas semu baik pada mode TE dan TM pada range 10^{-2} sampai 10^6 Ohm meter. Begitu pula pada kurva fasenya dimana range persebaran mengacak nilainya dari -180° sampai 180° baik pada mode TE maupun TM. Sedangkan pada gambar 4.9 yang merupakan hasil pengolahan data MT tanpa *filtering EMD* berbasis SSMT2000 didapati range nilai resistivitas semu yang lebih rapat di 10^{-1} sampai 10^3 Ohm meter dan fasenya pada range 0° sampai 90° pada mode TE dan -45° sampai -180° pada mode TM. Namun demikian, jika dilihat pada kurva resistivitas semunya, kurva pada gambar 4.8 maupun pada

gambar 4.9 sama-sama membentuk trend naik-turun-naik atau kurva H yang merupakan ciri persebaran resistivitas di daerah prospek panas bumi.

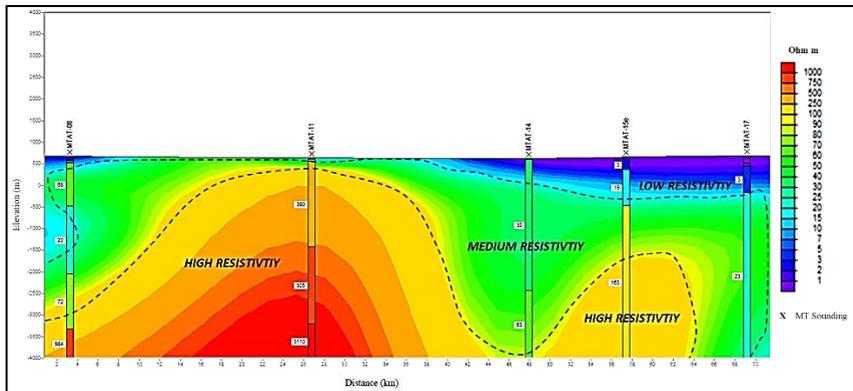
Hasil kurva resistivitas semu dan fase pada titik MT-08 ini, diketahui persebaran nilai baik resistivitas semu dan fase pada pengolahan data dengan *filtering EMD* berbasis matlab lebih mengacak dan kurang rapi jika disbanding dengan data hasil pengolahan tanpa *filtering EMD* berbasis SSMT2000. Hal ini mungkin terjadi karena ada beberapa tahap pengolahan data yang tidak dilakukan pada proses pengolahan data MT dengan Matlab, seperti proses kalibrasi data awal dan proses lain di *software* SSMT2000 yang mungkin tidak diketahui oleh penulis. Hasil yang sama terjadi pada semua data resistivitas semu dan fase di semua titik penelitian. Kurva resistivitas semu dan fase hasil pengolahan pada titik lain dilampirkan dalam lampiran.

4.3 Hasil Penampang Model 1D

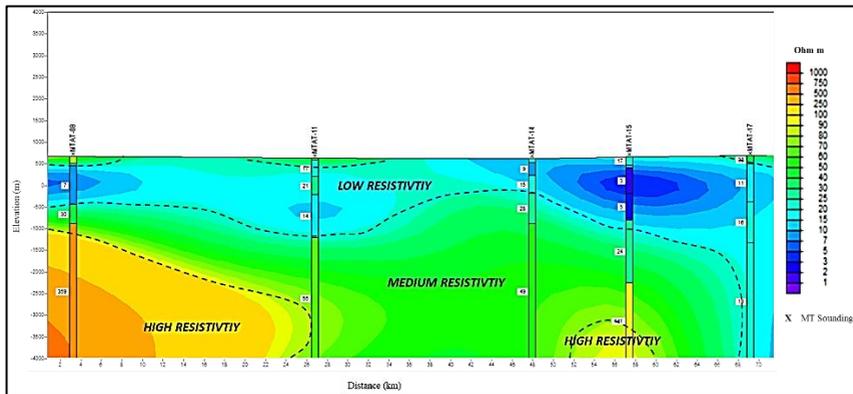
Data hasil pengolahan pada tahap sebelumnya berupa resistivitas semu dan fase merupakan data observasi. Untuk bisa mendapatkan persebaran resistivitas bawah permukaan maka perlu dilakukan metode inversi Magnetotelurik. Persebaran nilai pada kurva resistivitas semu dan fase data observasi bersifat *non linier* terhadap frekuensi gelombang EM di bumi. Maka dari itu dalam proses inversi data Magnetotelurik juga digunakan metode inversi *non linier*. Dalam penelitian ini penulis melakukan inversi 1D metode *Occam* terhadap data Magnetotelurik. Metode *Occam* merupakan metode inversi yang menggunakan pendekatan *linier* untuk menyelesaikan permasalahan *non-linier*. Metode ini dipilih oleh penulis karena dianggap menghasilkan kurva model yang lebih *smooth* jika disbanding dengan metode inversi *Bostick*.

Pada data hasil pengolahan menggunakan *filtering EMD*, hasil inversi 1D kemudian dibuat penampang persebaran resistivitas bawah permukaan dalam bentuk *cross section* dengan hasil seperti pada gambar 4.10. Tampilan model dibatasi sampai di kedalaman 4000 m. Juga ditampilkan log sounding hasil inversi 1D dari setiap titik pengukuran dengan nilai resistivitasnya. Dari hasil penampang model didapati nilai resistivitas rendah (*low resistivity*) pada range dari 0 – 15 Ωm dengan warna dominan biru, tersebar dari permukaan sampai elvasi sekitar -1800 m. Nilai *low resistivity* yang dalam terletak di area titik MT-08 lalu menipis di area MT-11 dan menebal lagi sampai titik MT-17. Nilai *high resistivity* dengan resistivitas $>100 \Omega\text{m}$ sampai nilai tertingginya di angka 3110

Ωm , terlihat membentuk 2 struktur kubah (antiklin) di area bawah titik MT-11 dan MT-15.



Gambar 4. 10 Penampang *Cross Section* Inversi 1D *Occam* pada Data MT Hasil Pengolahan dengan *Filtering EMD*

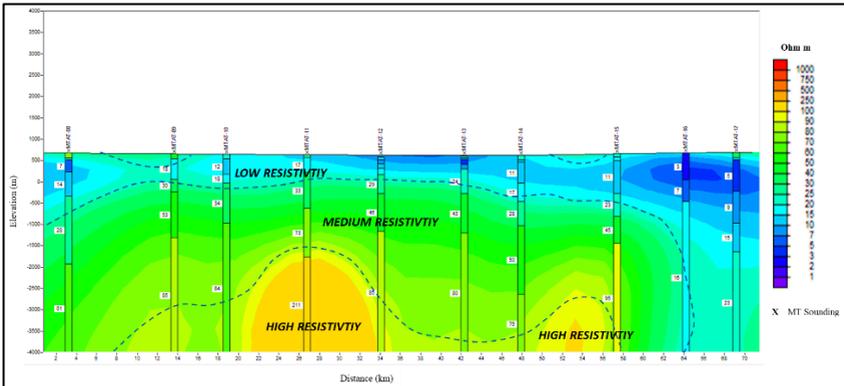


Gambar 4. 11 Penampang *Cross Section* Inversi 1D *Occam* pada Data MT Hasil Pengolahan tanpa *Filtering EMD*

Gambar 4.11 merupakan *cross section* 1D data hasil pengolahan tanpa menggunakan filtering EMD. Jika dibandingkan dengan model dari data hasil pengolahan dengan filtering EMD, terdapat perbedaan pada persebaran nilai

resistivitas rendah dimana pada gambar 4.11 ketebalannya lebih besar dan terlihat penebalan yang *continue* di area titik MT-17 sampai elevasi dibawah -4000 m sehingga terlihat membentuk *dooming*. Sedangkan pada gambar 4.10 Nilai resistivitas rendah di bawah area MT-17 juga terlihat muncul kembali di elevasi -3000 m namun seperti terputus atau tidak *continue*. Untuk persebaran *high resistivity*, pada kedua model sama-sama terlihat di area titik MT-15 namun pada gambar 4.11 nilainya tidak terlalu tinggi dan berada pada kedalaman yang lebih besar. Sedangkan perbedaannya terlihat di area MT-11 dimana pada gambar 4.11 tidak ada nilai *high resistivity*. Nilai *high resistivity* pada gambar 4.11 terlihat cenderung membentuk antiklin yang puncaknya di area titik MT-08.

Untuk validasi hasil model, maka penulis menggunakan data .edi hasil pengolahan yang telah dilakukan oleh pihak PSDMBP yang kemudian dimodelkan dengan cara yang sama dengan kedua model sebelumnya. Data yang digunakan berada pada line penelitian yang sama namun dengan jumlah titik pengukuran MT yang lebih banyak yaitu sejumlah 10 titik. Pengolahan yang dilakukan adalah pengolahan normal tanpa proses *filtering EMD*. Hasil *cross section* 1D dari data tersebut tervisualisasi pada gambar 4.12. Dari hasil model dari data .edi PSDMBP, diketahui jika gambar 4.10 memiliki pola persebaran resistivitas yang lebih mirip jika dibandingkan dengan model pada gambar 4.11. Pola yang sangat terlihat adalah struktur antiklin dari nilai *high resistivity* yang terletak dibawah titik MT-11 yang tidak muncul di gambar 4.11. Namun demikian, model pada gambar 4.10 yang merupakan hasil pengolahan data MT dengan *filtering EMD* memiliki beberapa perbedaan yang mencolok, yaitu dari range resistivitas dan kedalaman. Terlihat bahwa nilai *high resist* pada gambar 4.10 sampai di angka 3110 Ωm , sedangkan pada gambar 4.12 maksimum di 211 Ωm saja. Dari segi kedalaman juga, baik pada antiklin di bawah MT-11 maupun MT-15 pada model di gambar 4.12 lebih dalam jika dibandingkan dengan model pada gambar 4.10.



Gambar 4. 12 Penampang *Cross Section* Inversi 1D *Occam* pada Data MT Hasil Pengolahan tanpa *Filtering EMD* oleh PSDMBP

Data pendukung lain seperti data geologi atau data hasil pengukuran menggunakan metode geofisika lain tidak tersedia atau tidak dimiliki penulis sehingga validasi model hasil pengolahan data MT yang telah dilakukan menjadi terbatas. Namun demikian penulis mencoba mengkorelasikan model penampang resistivitas bawah permukaan yang didapatkan dengan peta geologi regional daerah penelitian. Jika dilihat pada peta geologi regional, *line* penelitian berada pada satu formasi yang sama dimana formasi tersebut merupakan satuan batuan tertua di daerah penelitian yang berumur Miosen Bawah – Awal Miosen Atas dan terdiri atas lava, breksi, anglomerat bersisipan tufa dan batupasir gampingan. Satuan batuan ini diperkirakan memiliki peran sebagai reservoir dalam sistem panasbumi yang pada ketiga model hasil pengolahan digambarkan sebagai zona *medium resistivity*. Zona *low resistivity* dengan resistivitas $<15 \Omega\text{m}$ yang berada di dekat permukaan diperkirakan merupakan batuan vulkanik yaitu batuan breksi yang terubahkan kuat, sehingga terbentuk zona impermeabel yang berperan sebagai *caprock*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan dan saran sebagai berikut:

5.1 Kesimpulan

- 1) Proses *filtering Empirical Mode Decomposition* (EMD) dapat diterapkan pada pengolahan data *time-series* Magnetotelurik dan menghasilkan data *time-series* yang lebih halus (*smooth*) jika dibanding dengan data asli yang sinyalnya bersifat *spiky* atau bergelombang tajam.
- 2) Proses *filtering* EMD pada pengolahan data *time-series* Magnetotelurik mampu menekan sifat *non-stasioner* pada data yang disebabkan oleh adanya *noise* pada saat pengukuran atau gangguan pada proses perambatan gelombang elektromagnetik.
- 3) Model *cross section* 1D dari data hasil pengolahan dengan menggunakan *filtering* EMD memiliki kesesuaian pola persebaran resistivitasnya dengan model dari data .EDI hasil pengolahan PSDMBP jika dibandingkan dengan data yang diolah tanpa *filtering* EMD. Namun masih memiliki perbedaan dari sisi *range* nilai resistivitasnya yang lebih lebar.

5.2 Saran

- 1) Kedepan perlu dilakukan penyempurnaan dalam proses pengolahan data Magnetotelurik berbasis MATLAB sehingga bisa didapatkan kurva resistivitas semu dan fase yang rapi. Seperti proses kalibrasi data, proses seleksi *crosspower*, ataupun proses lain sesuai dengan *software* pengolahan data MT yang ada yang mungkin terlewatkan oleh penulis dalam penelitian ini.
- 2) Diperlukan adanya data geologi atau data pengukuran lainnya sebagai pendukung atau validasi atas model hasil pengolahan data yang dilakukan.

**HALAMAN INI
SENGAJA DIKOSONGKAN**

DAFTAR PUSTAKA

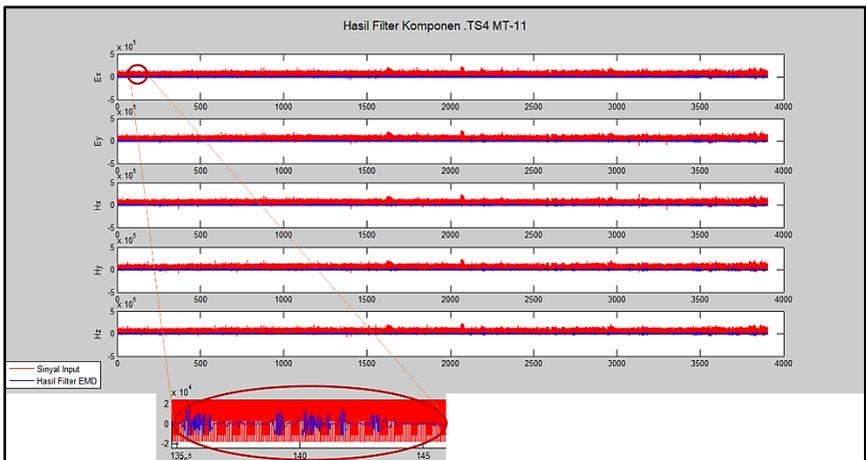
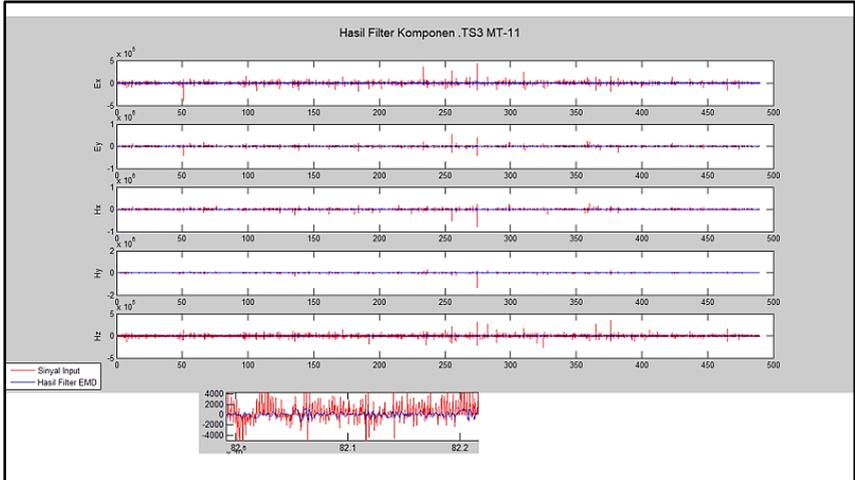
- Borah, U.K., Patro, P.K. dan Suresh, V. (2015), "Processing of Noisy Magnetotelluric Time Series from Koyna-Warna Seismic Region, India: A Systematic Approach", *Annals of Geophysics*, Vol.58, No.2, hal. 0222. <http://doi.org/10.4401/ag-6690>.
- Chen, J., dan Jegen-Kulcsar, M. (2007), *The empirical mode decomposition (EMD) method in MT data processing*. In 22nd Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, October 1–5, 2007, Dčín, Czech Republic (pp. 67–76).
- Chen, J., Heincke, B., Jegen, M. dan Moorkamp, M. (2012), Using empirical mode decomposition to process marine magnetotelluric data. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05470.x>.
- Constable, S., Parker, R. dan Constable, C. (1987), "Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data", *GEOPHYSICS*, Vol.52, No.3, hal. 289–300. <http://doi.org/10.1190/1.1442303>.
- Egbert, G., and J. Booker (1986), *Robust estimation of geomagnetic transfer functions*, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 87, 173–194.
- Grandis, H. (2013), *METODA MAGNETOTELURIK (MT)*, hal. 131–149.
- Heditama, D.M. (2011), *Pemrosesan data time series pada metode Magnetotelurik (MT) menjadi data resistivitas semu dan fase menggunakan matlab*, FMIPA UI, Depok.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., Liu, H. H. (1998), "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis". <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Jian-hua, C. (2016), A combinatorial filtering method for magnetotelluric data series with strong interference. <http://doi.org/10.1007/s12517-016-2658-5>.
- Kaufman, A.A. dan Keller, G. V (1981), *The Magnetotelluric Sounding Method*, *Methods in geochemistry and geophysics*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration (3rd ed.)*. Oxford, UK: Blackwell Science.
- Lestari, W., Widodo, A., Warnana, D.D., Syaiffudin, F., Utama, W., dan Rohman, J.P.G.N. (2018), *Mapping of Kendeng Thurst Active Fault in East Java using Magnetotelluric Method*. EAGE-HAGI 1st Asia Pasific

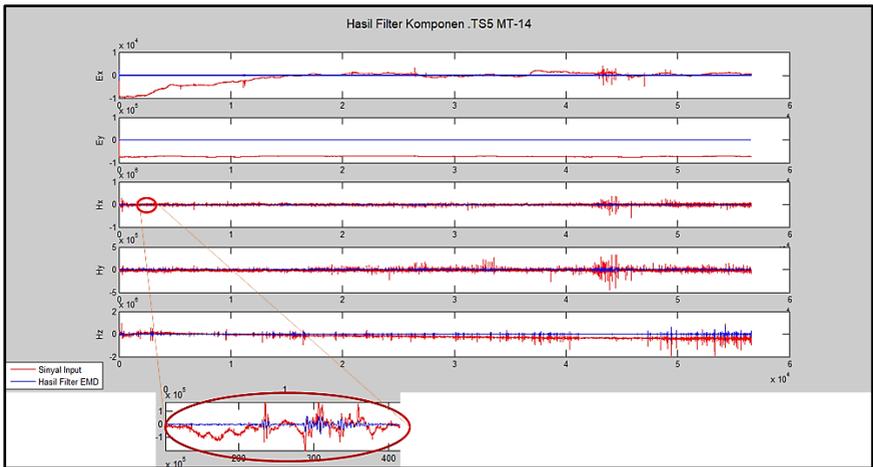
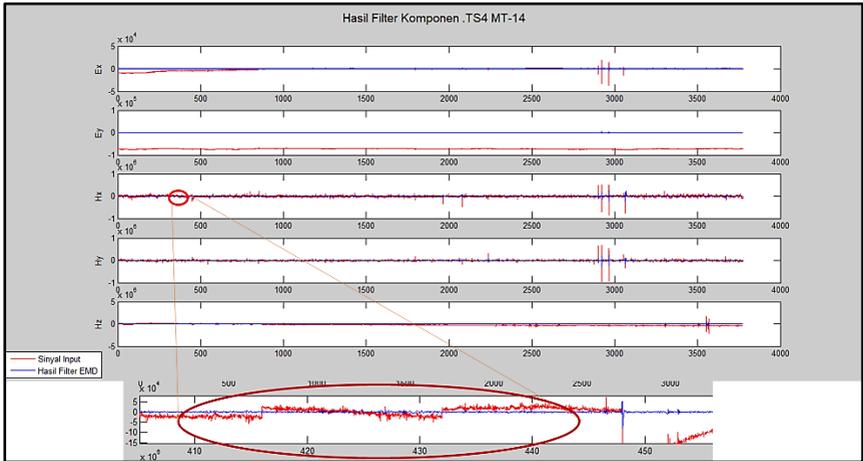
Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering.
<http://doi.org/10.3997/2214-4609.201800424>

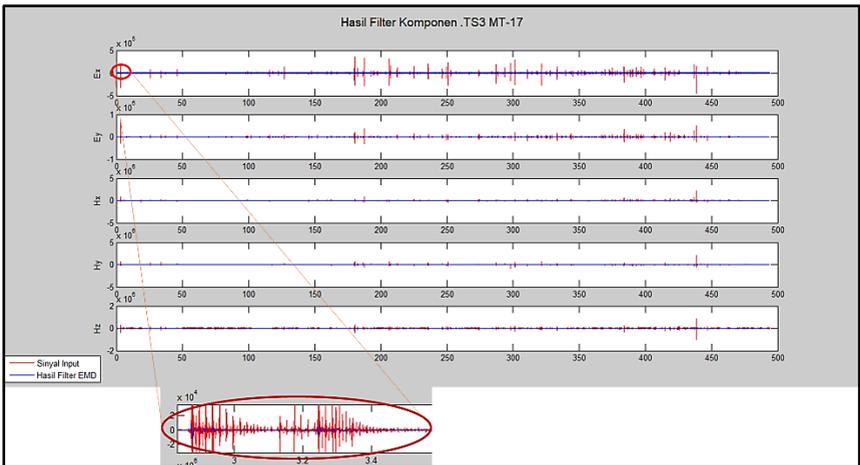
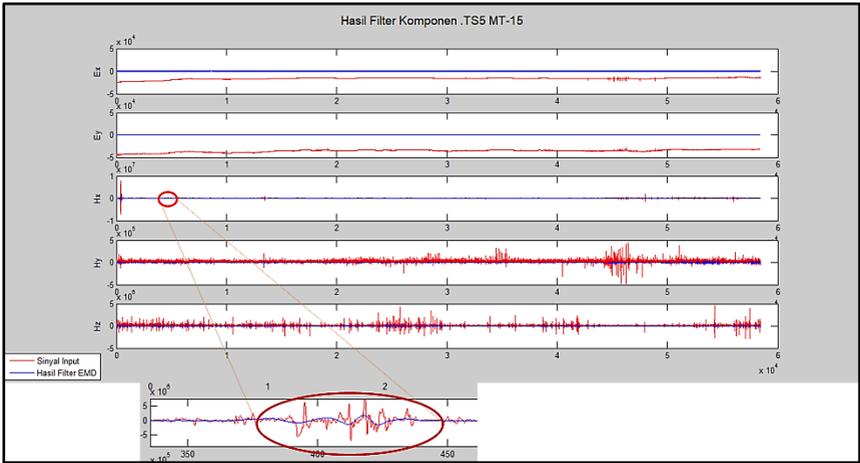
- Liati, D., Sulisty, A., Nugramadha, W.A. dan Daud, Y. (2010), *Study of Static Shift Correction for Magnetotelluric (MT) Data using Averaging and CoKriging Methods upon 3-Dimensional Forward Model of Geothermal Field.*
- Nave, R. (2012), "Exploring Physics and Astronomy in a Neutral-net Type Environment: Huperphysics". Georgia State University, Atlanta.
- Nagata, H., H. Mikada, T.N. Goto, J. Takekawa dan T. Kasaya (2012), *Data processing of magnetotelluric survey data in time domain using digital filter - An Example at the Nankai trough*, Extended Abstract, 21st EM Induction Workshop, Darwin, Australia, 1-4.
- Neukirch, M., dan X. Garcia. (2014), *Nonstationary magnetotelluric data processing with instantaneous parameter*, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 1634–1654, doi:10.1002/2013JB010494.
- 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.
- Rusbiyanto, A. (2011), Reduksi noise pada pemrosesan data Magnetotelurik (MT) dengan menggunakan remote reference, FMIPA UI, Depok.
- Simpson, F. dan Bahr, K. (2005), *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press, Cambridge, 270 pp.
- Smirnov, M. Y. (2003). Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point. *Geophys. J. Int.* 152 , 1-7.
- Szarka, L. (1988), *Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth - a review*, Surveys in Geophysics, 9, 287–318.
- van Leuween, W. (2016), *Geothermal Exploration Using Magnetotelluric Method*. Urecht Studies in Earth Sciences 115. Utrecht.
- Wijaya, R.A.K., Bahri, A.S., Warnana, D.D. dan Darmawan, A.D. (2016), "Inversi 1-D Pada Data Magnetotelurik Di Lapangan X Menggunakan Metode Occam Dan Simulated Annealing", Jurnal Geosaintek, Vol.2, No.2, hal. 75-80–80. <http://doi.org/10.12962/j25023659.v2i2.1920>.

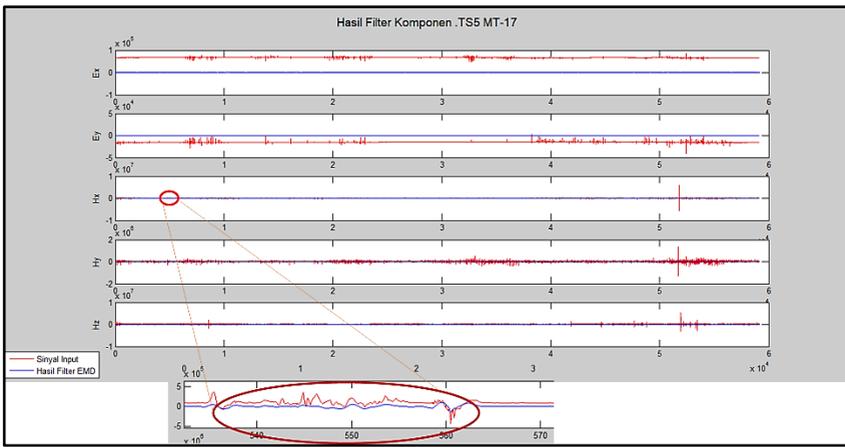
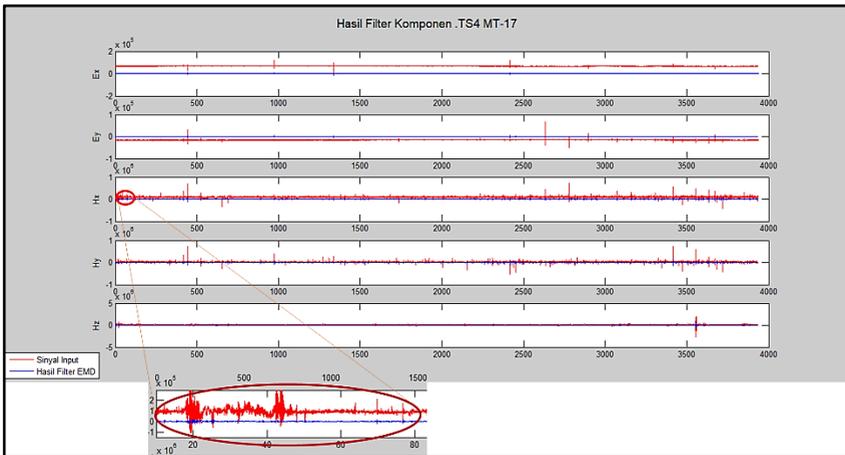
LAMPIRAN

1. Kurva Time Series Hasil Filtering EMD

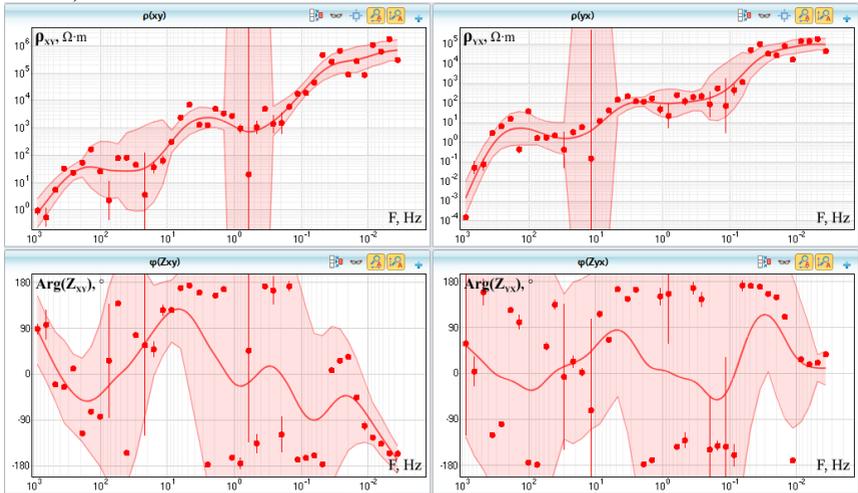




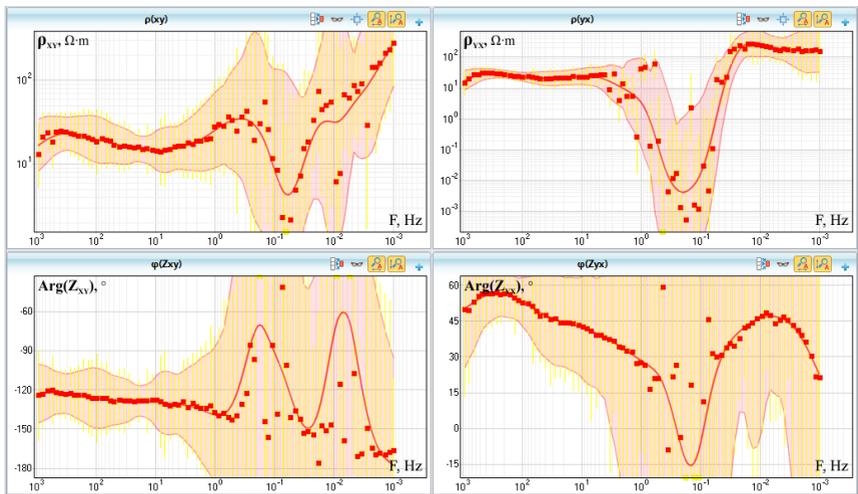




2. Kurva Resistivitas Semu dan Fase
a) MT-11

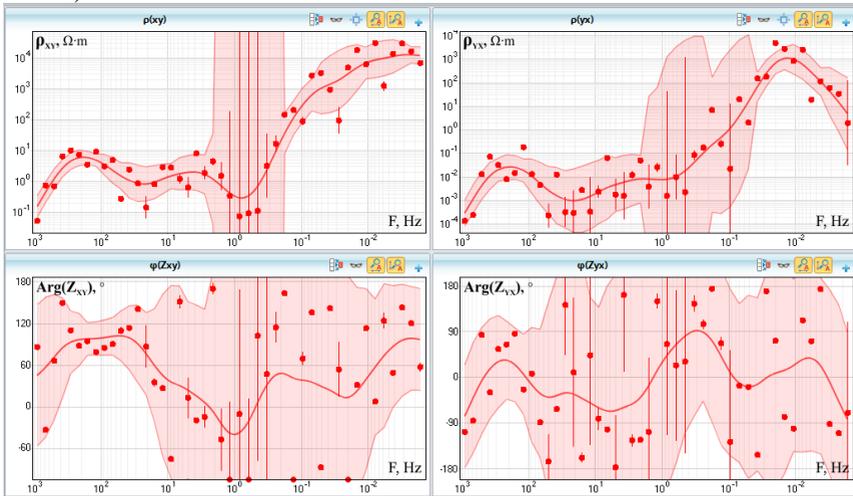


Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan dengan *Filtering EMD*

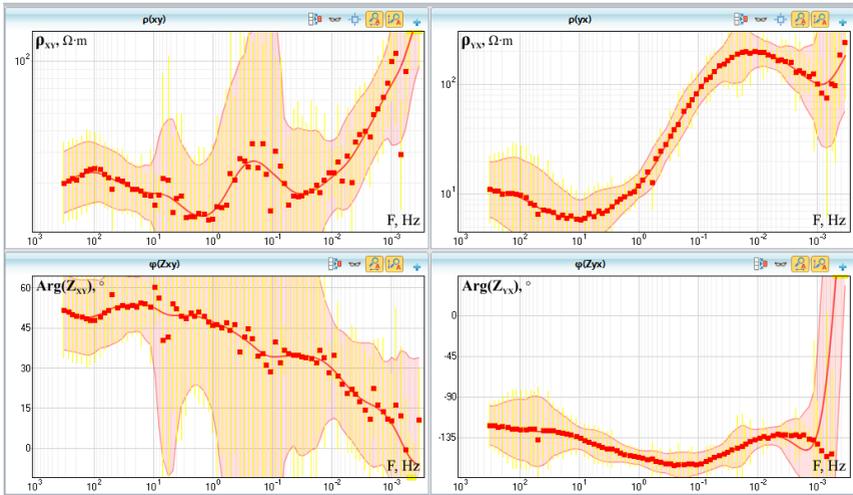


Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan Tanpa *Filtering EMD*

b) MT-14

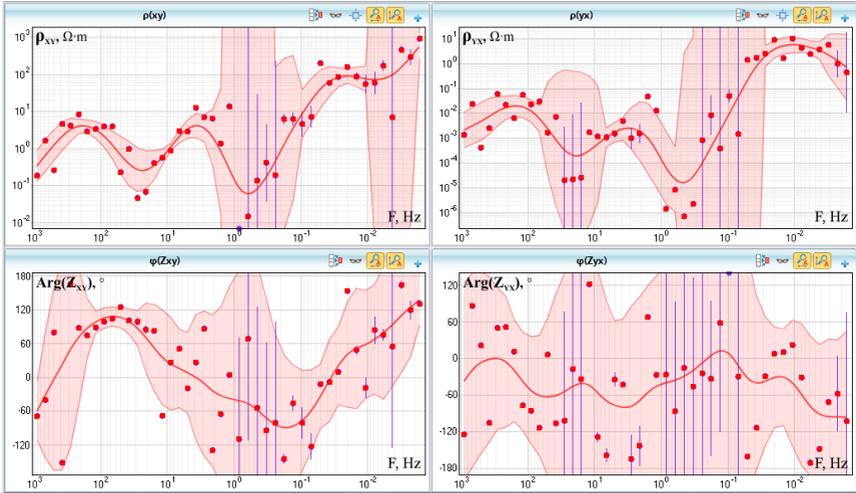


Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan dengan *Filtering EMD*

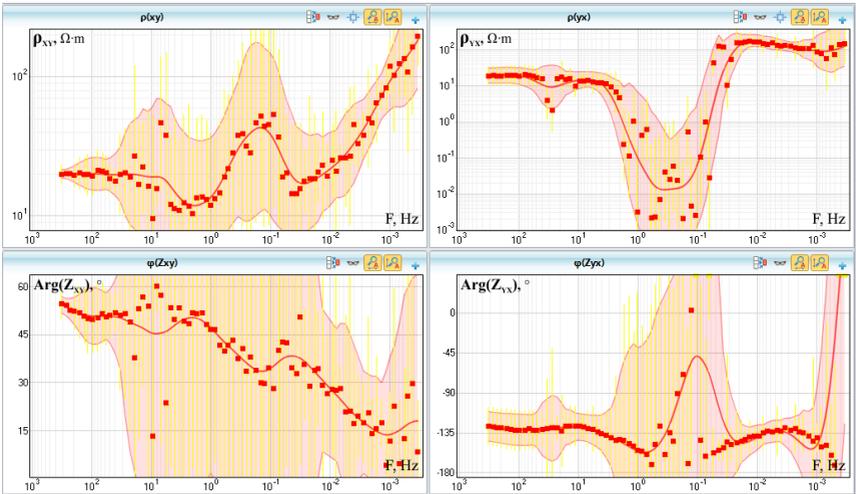


Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan Tanpa *Filtering EMD*

c) MT-15

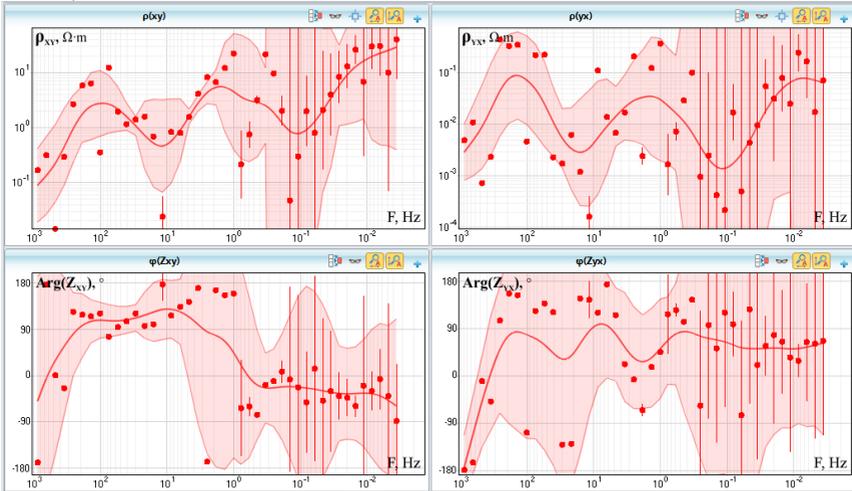


Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan dengan *Filtering EMD*

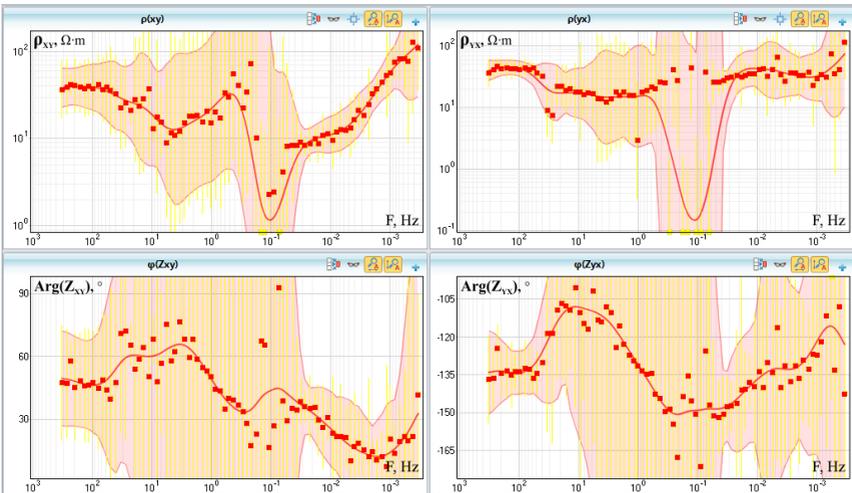


Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan Tanpa *Filtering EMD*

d) MT-17



Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan dengan *Filtering EMD*



Kurva Resistivitas Semu dan Fase Hasil Pengolahan Tanpa *Filtering EMD*

BIOGRAFI PENULIS



Nugroho Syarif Setiawan, lahir di Klaten pada 9 April 1997 dan merupakan anak pertama dari Bapak Setiyono (Alm) dan Ibu Atik Suparti. Penulis menempuh pendidikan formalnya di SDN 1 Jatinom (2003-2009), SMPN 1 Karanganom (2009-2012), SMAN 1 Karanganom (2012-2015). Penulis diterima di Departemen Teknik Geofisika ITS pada tahun 2015. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai organisasi intra-kampus, diantaranya sebagai Staff Departemen Riset dan Teknologi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS (2016-2018), Ketua Departemen HRD Lembaga Dakwah Jurusan Teknik Geofisika ITS (2017-2018), Sekretaris Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia Wilayah IV (2017-2018), dan menjadi staff di *Society of Exploration Geophysicist (SEG) ITS SC* (2016-2018). Penulis juga pernah menjadi santri di Yayasan SDM IPTEK pada tahun 2017. Selain itu penulis juga aktif mengikuti berbagai jenis pelatihan seperti *field trip* geologi ke Kabuh, Wringin Anom, dan Karangasambung. Mengikuti *company visit* dan kerja praktik di PT. Star Energy Geothermal Wayang Windu, pelatihan pengolahan data Magnetotelurik oleh Pusat Survey Geologi (2017) dan oleh PT. Elnusa (2019). Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis bekerjasama dengan Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) dalam penyediaan data dan *software*. Penulis memiliki *passion* dalam metode elektromagnetik dan bidang eksplorasi panas bumi Apabila pembaca ingin berdiskusi baik mengenai Tugas Akhir maupun hal yang lain dapat menghubungi penulis melalui alamat email nugrohosyarif09@gmail.com atau melalui nomor telepon 085815250851.