



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMROSESAN DATA MAGNETOTELLURIK YANG
TERKONTAMINASI *NOISE* DENGAN MENGGUNAKAN
FILTER DIGITAL DAN SELEKSI DATA *TIME SERIES*
BERBASIS MATLAB**

SKRIPSI

**MOHAMAD LUTFI ISMAIL
1106050992**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2015**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMROSESAN DATA MAGNETOTELLURIK YANG
TERKONTAMINASI *NOISE* DENGAN MENGGUNAKAN
FILTER DIGITAL DAN SELEKSI DATA *TIME SERIES*
BERBASIS MATLAB**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
sarjana sains**

**MOHAMAD LUTFI ISMAIL
1106050992**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
PEMINATAN GEOFISIKA
DEPOK
JUNI 2015**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Mohamad Lutfi Ismail
NPM : 1106050992

Tanda Tangan :
Tanggal : 23 Juni 2015



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Mohamad Lutfi Ismail
NPM : 1106050992
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : Pemrosesan pada Data Magnetotellurik yang
Terkontaminasi Noise Dengan Menggunakan Filter
Digital dan Seleksi Data *Time Series* Berbasis Matlab

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc (.....)
Penguji : Drs. M. Syamsu Rosid, M.T. (.....)
Penguji : Dr. Eng. Yayan Sofyan, M.Si (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Juni 2015

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur bagi Tuhan Yang Maha Esa karena atas izin dan kehendak-Nya penelitian tugas akhir yang dilakukan oleh penulis di PT NewQuest Geotechnology ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian yang dilakukan penulis ini berlangsung selama lebih dari 6 bulan ini mengangkat topik “*Pemrosesan Data Magnetotellurik yang Terkontaminasi Noise dengan Menggunakan Filter Digital dan Seleksi Data Time Series*”. Penelitian ini dimaksudkan untuk mencari solusi dari permasalahan yang sering ditemukan pada berbagai survey MT dimana data mentah berupa *time series* medan elektromagnetik yang terukur rentan terkontaminasi *noise* yang sangat beresiko jika diproses tanpa proses filterisasi. Penulis menyadari bahwa penelitian ini tidak akan berjalan lancar tanpa bantuan dan bimbingan yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Yunus Daud, Dipl. Geotherm. Tech, M.Sc., selaku pembimbing skripsi yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, tenaga, dan berbagai bantuan lainnya dalam penelitian ini.
2. Bapak Drs. M. Syamsu Rosyid, M.T., dan Bapak Dr. Eng. Yayan Sofyan, M.Si, selaku penguji yang telah bersedia untuk berdiskusi dan memberikan kritikan serta saran yang berharga bagi penelitian penulis
3. Seluruh dosen yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam menimba ilmu selama proses perkuliahan.
4. PT. NewQuest Geotechnology, sebagai institusi yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menggunakan berbagai fasilitas yang diperlukan selama proses penelitian ini.
5. Kak Wambra Aswo, M.Si, S.Si, Kak Dzil Mulki, M.Si, S.Si, Kak Ratna Dewi, S.Si, Kak Fikri Fahmi, S.Si, Kak Donny Isa, S.Si, dan Kak Surya Aji Pratama, M.Si, S.Si, selaku pembimbing teknis yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian ini.
6. Orang tua dan keluarga penulis yang telah mendukung penulis baik secara moril maupun materil dalam menghadapi segala tantangan dan rintangan dalam proses penulis menuntut ilmu; dan

7. Sahabat dan kerabat dekat yang telah menemani dan membantu penulis menyelesaikan penelitian ini.

Dengan adanya skripsi sebagai dokumentasi tertulis ini, penulis berharap agar pembaca dapat lebih memahami tentang berbagai permasalahan yang sering dijumpai dalam survey MT terutama *noise* dan teknik penyelesaiannya.

Namun, penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini sehingga saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan demi evaluasi diri dalam melakukan penelitian. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan sumbangsih terhadap ilmu pengetahuan di Bidang Geofisika, khususnya pengembangan metode MT dalam menghasilkan kualitas data yang lebih baik menggunakan teknik-teknik pengeliminasian *noise* pada data MT.

Depok, 23 Juni 2015

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Mohamad Lutfi Ismail
NPM : 1106050992
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

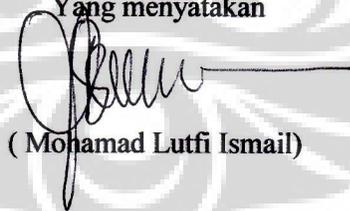
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Pemrosesan Data Magnetotellurik yang Terkontaminasi *Noise* dengan Menggunakan Filter Digital dan Seleksi Data *Time Series* Berbasis Matlab

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 23 Juni 2015
Yang menyatakan



(Mohamad Lutfi Ismail)

ABSTRAK

Nama : Mohamad Lutfi Ismail
Program Studi : Fisika
Judul : Pemrosesan Data Magnetotellurik yang Terkontaminasi *Noise* dengan Menggunakan Filter Digital dan Seleksi Data *Time Series* Berbasis Matlab

Metode Magnetotellurik (MT) merupakan suatu teknik elektromagnetik pasif yang sangat efektif dalam menggambarkan distribusi tahanan jenis batuan bawah permukaan bumi. Namun, metode ini sangat sensitif terhadap *noise* yang timbul akibat aktivitas mekanik seperti vibrasi dan aktivitas kelistrikan seperti aliran listrik pada *powerline* yang berada didekat titik pengukuran. Untuk mengeliminasi *noise* ini digunakan filter digital yang terdiri dari *median filter* dan *notch filter*. *Median filter* digunakan untuk mengeliminasi *spike noise* yang bersifat irreguler, sedangkan *notch filter* untuk *harmonic powerline noise* yang bersifat reguler. Seleksi data *time series* digunakan untuk mengeliminasi *noise* yang bersifat ireguler, tetapi tidak dapat dieliminasi oleh *median filter*. Filter-filter ini dibangun dalam program MFilter yang dapat mengolah dan memfilter data *time series* MT hingga didapatkan kurva resistivitas dan fase dalam domain frekuensi. Hasil pengolahan data dan inversi menunjukkan bahwa teknik pengeliminasian *noise* menggunakan filter digital ini dapat meningkatkan kualitas data dan mengurangi resiko kegagalan pemboran.

Kata kunci:
filter digital; magnetotellurik (MT); *powerline noise*; *spike noise*; *time series selection*

ABSTRACT

Name : Mohamad Lutfi Ismail
Study Program : Physics
Title : Matlab Based Processing Noisy Magnetotelluric Data using
Digital Filter and Time Series Data Selection

Magnetotelluric (MT) Method is a very effective techniques to describe the distribution of rock resistivity below the earth's surface. However, this method is very sensitive to noise which is arising from mechanical activity such as vibration and electrical activity such as powerline current. Digital noise filter consisting of median filter and notch filter is used to eliminate those noise. Median filter is used to eliminate spike noise which is irregular, while notch filter is used to eliminate harmonic powerline noise which is regular. The selection of time series data is used to eliminate noise which is irregular, but can not be overcome by the median filter. All these filters are built in MTFilter program which is can process MT data from time series data until provide apparent resistivity and phase data in frequency domain. Based on results of data processing and inversion model, we conclude that these techniques can improve data quality and reduce the risk of drilling failures..

Keywords:
digital filter; magnetotelluric (MT); powerline noise; spike noise; time series selection

DAFTAR ISI

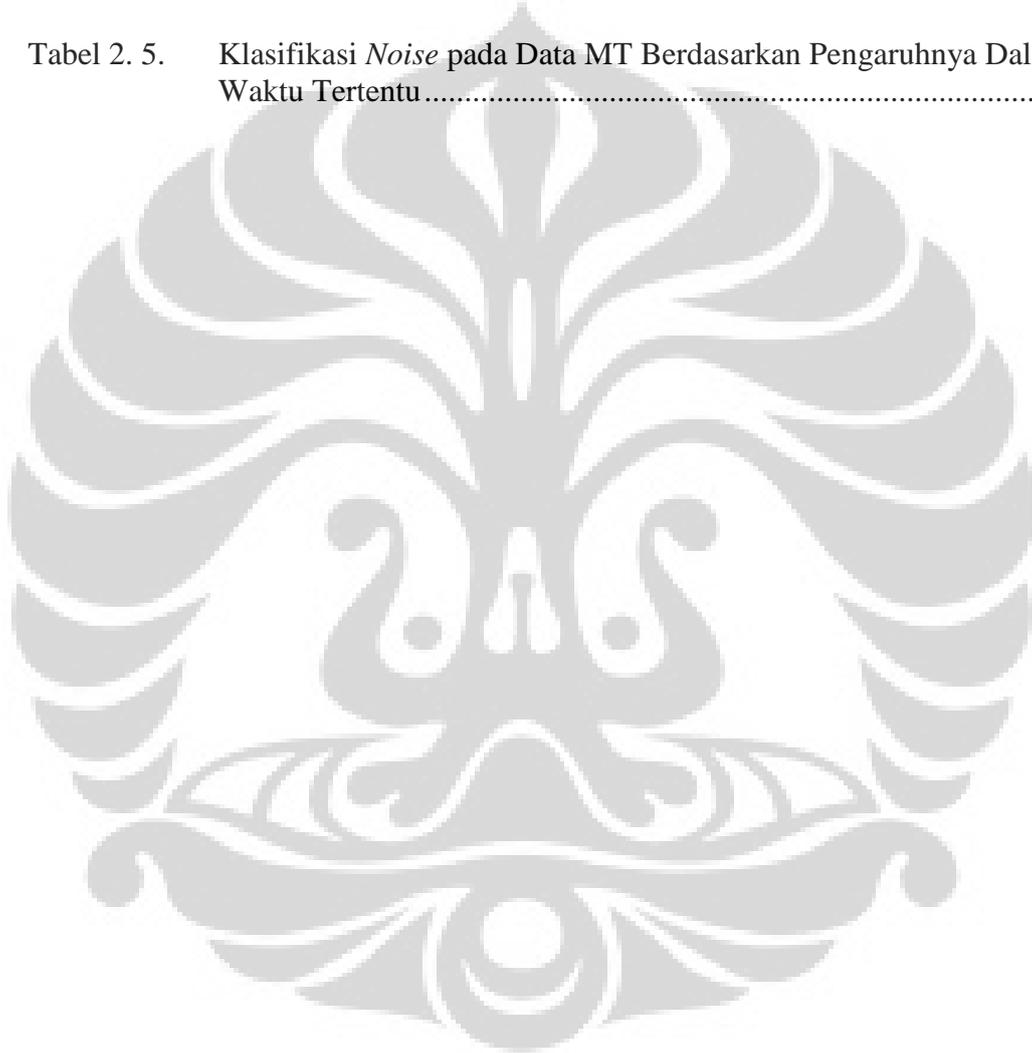
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR.....	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Metode Penelitian	5
1.7 Sistematika Penulisan	7
BAB 2 LANDASAN TEORI	9
2.1 Konsep Dasar Metode Magnetotellurik	9
2.1.1 Persamaan Maxwell	10
2.1.2 Medan Elektromagnetik dan <i>Skin Depth</i>	11
2.1.3 Tensor Impedansi	13
2.2 Sinyal dan <i>Noise</i> pada Metode Magnetotellurik	18
2.2.1 Sumber dan Karakteristik Sinyal Magnetotellurik.....	18
2.2.2 Sumber dan Karakteristik <i>Noise</i> yang Mengkontaminasi Sinyal Magnetotellurik.....	20
2.2.3 Teknik Pengeliminasi <i>Noise</i> pada Data Magnetotellurik.....	24
2.3 Instrumen dan Prosedur Lapangan.....	26
2.3.1 Sensor Medan Listrik dan Medan Magnet	26
2.3.2 Teknik Preventif untuk Menghindari <i>Noise</i> pada Akuisisi Data.....	28
2.4 Pengolahan Data Magnetotellurik.....	29
2.5 Penggunaan Magnetotellurik dalam Ekplorasi Sistem Panas Bumi	36
BAB 3 PEMBUATAN PROGRAM DAN PENGOLAHAN DATA	39
3.1 Pembuatan Program dengan Menggunakan MATLAB.....	39
3.2 Graphical User Interface (GUI) Program MFilter	46
3.3 Pengolahan Data Menggunakan MFilter	48
3.4 Pengolahan Data Menggunakan SSMT 2000	50
3.5 Inversi dan Visualisasi	57
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	60
4.1 Analisis dan Komparasi Data <i>Time Series</i> dan <i>Frequency Series</i>	60
4.1.1 Inspeksi Visual	61
4.1.2 Autokorelasi	68
4.1.3 Koherensi	71
4.1.4 Analisis Spektra.....	73
4.2 Analisis dan Komparasi Data Resistivitas Semu dan Fase.....	76

4.3 Inversi dan Visualisasi Data.....	81
BAB 5 PENUTUP	82
4.1 Kesimpulan	82
4.2 Saran	83
DAFTAR REFERENSI	84



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1.	Komparasi Tensor pada Model Bumi 1, 2, dan 3 Dimensi	17
Tabel 2. 2.	Jenis-Jenis Sinyal MT.....	19
Tabel 2. 3.	Klasifikasi <i>Noise</i> pada Data MT Berdasarkan Pengaruhnya.....	22
Tabel 2. 4.	Klasifikasi <i>Noise</i> Pada Data MT Berdasarkan Sumbernya	22
Tabel 2. 5.	Klasifikasi <i>Noise</i> pada Data MT Berdasarkan Pengaruhnya Dalam Waktu Tertentu.....	22



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....	5
Gambar 2. 1. Konsep Fisis Metode Magnetotelurik	11
Gambar 2. 2. Model Bumi Dua Dimensi pada Metode Magnetotellurik.....	15
Gambar 2. 3. Sinyal pada Metode MT	18
Gambar 2. 4. Determinasi Kualitas Data MT.....	20
Gambar 2. 5. Trend kurva resistivitas (kiri) dan fase (kanan) dari data baik dan kurang baik.	21
Gambar 2. 6. <i>Harmonic Powerline Noise</i> dan Hamonisanya pada Spektrum Frekuensi	23
Gambar 2. 7. a. <i>Noise</i> Akibat Aktivitas Industrial b. <i>Noise</i> Akibat Aktivitas Kendaraan c. <i>Noise</i> Akibat Angin Yang Menggetarkan Pohon.....	24
Gambar 2. 8. <i>Notch Filter</i> sebagai Pengeliminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i> ...	25
Gambar 2. 9. Media Filter untuk Menghilangkan <i>Spike Noise</i> . Sinyal sebelum difilter (kiri) dan Setelah Difilter (kanan)	25
Gambar 2. 10. <i>Maximum Entropy Extension</i> dan <i>Windows deconvolution</i> untuk Menghilangkan <i>Spike Noise</i>	26
Gambar 2. 11. Konfigurasi Akuisisi Data MT	27
Gambar 2. 12. Pengaruh Aliran <i>Powerline</i> terhadap Data MT pada Jarak Tertentu dari Sumbernya.....	28
Gambar 2. 13. Konsep <i>Remote Reference</i>	29
Gambar 2. 14. Tahapan Pengolahan Data MT.	30
Gambar 2. 15. Transformasi Fourier	31
Gambar 2. 16. Komparasi Antara Data Tanpa <i>Window Tapering</i> (kiri) dan menggunakan <i>Window Tapering</i> (kanan).....	32
Gambar 2. 17. Tingkat sensitivitas sensor terhadap frekuensi	33
Gambar 2. 18. Komparasi Antara Estimasi Robust dengan <i>Least Square</i>	35
Gambar 2. 19. Kurva MT Sebelum (atas) dan Sesudah (bawah) dikoreksi statik.	36

Gambar 2. 20. Sistem Panas Bumi	37
Gambar 2. 21. Respon MT pada sistem Panas Bumi	38
Gambar 2. 22. Proses Pembuatan Segmen dan Seleksi Data <i>Time Series</i>	40
Gambar 3. 1. Mekanisme Kerja Program.....	39
Gambar 3. 2. Respon <i>Notch Filter</i> pada Program MTFilter	41
Gambar 3. 3. Skema Proses Pengolahan <i>Median Filter</i> sebagai <i>Spike Eliminator</i>	42
Gambar 3. 4. Salah Satu Model Sinyal Sintetik.....	43
Gambar 3. 5. Autokorelasi dari Sinyal Non Periodik (Garis Lurus).....	44
Gambar 3. 6. Autokorelasi dari Sinyal Sintetik. (a) Sinyal Sintetik (d) 100% <i>Noise</i> (c) Sinyal Sintetik yang Terkontaminasi <i>Noise</i> (d) Autokorelasi Sinyal Sintetik (e) Autokorelasi 100% <i>Noise</i> (d) Autokorelasi Sintetik yang Terkontaminasi <i>Noise</i>	44
Gambar 3. 7. Koherensi pada Sinyal Sintetik	46
Gambar 3. 8. <i>Home Screen</i> pada Program MTFilter.....	47
Gambar 3. 9. Fitur Tambahan dan Filter <i>Time Series</i> pada Program MTFilter ...	47
Gambar 3. 10. Input File MTU.....	48
Gambar 3. 11. Visualisasi Data <i>Time Series</i> pada MTFilter.....	49
Gambar 3. 12. Spektrum Frekuensi.....	49
Gambar 3. 13. Kurva Resistivitas Semu dan Fase	50
Gambar 3. 14. <i>Phoenix System</i>	50
Gambar 3. 15. Proses Pencuplikan Data <i>Time Series</i> pada Instrumen <i>Phoenix</i> ...	51
Gambar 3. 16. Visualisasi <i>Raw Data Time Series</i> pada Synchro TSV	52
Gambar 3. 17. Visualisasi Spektrum Frekuensi	53
Gambar 3. 18. Pilihan Jenis Window Tapering pada Sistem Phoenix	53
Gambar 3. 19. Visualisasi Koherensi Antar Komponen Pada Synchro TSV.....	54

Gambar 3. 20. Kurva resistivitas (kiri atas) dan fase (kiri bawah) beserta data crosspowernya (kanan).....	56
Gambar 3. 21. Sebaran stasiun pengukuran	57
Gambar 3. 22. Pemberian <i>Range</i> Warna.	58
Gambar 3. 23. Penentuan <i>Mesh Grid</i>	58
Gambar 3. 24. Contoh Hasil inversi.	59
Gambar 4. 1. Sinyal Sintetik A yang Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i> (kiri) Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> (kanan)	60
Gambar 4. 2. Sinyal Sintetik A Hasil Superposisi Gelombang 100 Hz, 219 Hz, 375 Hz, dan 563 Hz.	61
Gambar 4. 3. Sinyal Sintetik A yang Terkontaminasi Noise <i>Powerline</i> 50 Hz ...	61
Gambar 4. 4. Komparasi Antara Sinyal A Tanpa <i>Harmonic Powerline Noise</i> dan Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i>	62
Gambar 4. 5. Sinyal Hasil Filterisasi Menggunakan <i>Notch Filter</i>	62
Gambar 4. 6. Komparasi Antara Sinyal A dengan Sinyal A Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i> yang telah Difilterisasi oleh <i>Notch Filter</i>	62
Gambar 4. 7. Data Lapangan yang Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i>	63
Gambar 4. 8. Contoh Implementasi <i>Notch Filter</i> Pada Data Lapangan.....	63
Gambar 4. 9. Sinyal Sintetik B Hasil Superposisi Gelombang 10 dan 20 Hz.....	64
Gambar 4. 10. Sinyal B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i>	64
Gambar 4. 11. Komparasi <i>Median Filter</i> dengan <i>Moving Average Filter</i>	65
Gambar 4. 12. Hasil Filterisasi Sinyal B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Menggunakan <i>Moving Average Filter</i>	65
Gambar 4. 13. Hasil Filterisasi Sinyal B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Menggunakan <i>Median Filter</i>	66
Gambar 4. 14. Contoh Implementasi <i>Median Filter</i> Pada Data Lapangan. (a) Sebelum difilterisasi (b) Setelah Difilterisasi.....	67
Gambar 4. 15. Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik A yang Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i> Sebelum dan Sesudah Difilterisasi	68

Gambar 4. 16. Autokorelasi Pada Sinyal Data Lapangan yang Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i> Sebelum dan Sesudah Difilterisasi	69
Gambar 4. 17. Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Sebelum Dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan <i>Median Filter</i>	69
Gambar 4. 18. Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Sebelum Dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan <i>Moving Average Filter</i>	70
Gambar 4. 19. Komparasi Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Sesudah Difilterisasi Menggunakan <i>Moving Average Filter</i> dan <i>Median Filter</i>	70
Gambar 4. 20. Autokorelasi Pada Sinyal Data Lapangan yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Sebelum dan Sesudah Difilterisasi	71
Gambar 4. 21. Koherensi Data Lapangan yang Terkontaminasi <i>Harmonic Powerline Noise</i> Sebelum dan Sesudah Difilterisasi.....	72
Gambar 4. 22. Koherensi Data Lapangan yang Terkontaminasi <i>Spike Noise</i> Sebelum dan Sesudah Difilterisasi	72
Gambar 4. 23. Analisis Spektra pada Sinyal Sintetik A	73
Gambar 4. 24. Contoh Implementasi <i>Notch Filter</i> Pada Data Lapangan. (a) Spektrum Sebelum difilterisasi (b) Spektrum Setelah Difilterisasi	74
Gambar 4. 25. Analisis Spektra Sinyal Sintetik B Sebelum dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan <i>Median Filter</i>	75
Gambar 4. 26. Analisis Spektra Sinyal Sintetik B Sebelum dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan <i>Moving Average Filter</i>	75
Gambar 4. 27. Contoh Implementasi <i>Notch Filter</i> Pada Data Lapangan. (a) Spektrum Sebelum difilterisasi (b) Spektrum Setelah Difilterisasi	76
Gambar 4. 28. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 1 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan <i>Notch Filter</i>	77
Gambar 4. 29. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 1 yang Diolah Menggunakan MTFILTER dan SSMT 2000	77

Gambar 4. 30. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 2 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan <i>Notch</i> <i>Filter</i>	78
Gambar 4. 31. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 2 yang Diolah Menggunakan MTFilter dan SSMT 2000.....	78
Gambar 4. 32. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 3 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan <i>Median</i> <i>Filter</i>	78
Gambar 4. 33. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 3 yang Diolah Menggunakan MTFilter dan SSMT 2000.....	79
Gambar 4. 34. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 4 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan <i>Median</i> <i>Filter</i>	79
Gambar 4. 35. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 4 yang Diolah Menggunakan MTFilter dan SSMT 2000.....	79
Gambar 4. 36. Data Titik 5 Sebelum Dilakukan Seleksi Data <i>Time Series</i>	80
Gambar 4. 37. Data Titik 5 Setelah Dilakukan Seleksi Data <i>Time Series</i>	80
Gambar 4. 38. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 5 yang Diolah Menggunakan MTFilter dan SSMT 2000.....	80
Gambar 4. 39. Hasil Inversi 2D dari Data yang Diolah Menggunakan (a) MTFilter (b) SSMT 2000	81

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Metode Magnetotellurik (MT) merupakan metode elektromagnetik pasif yang memanfaatkan variasi medan listrik dan medan magnet natural, dimana kedua medan ini diukur diatas permukaan bumi dalam arah yang saling tegak lurus. Menurut Tikhonov pada tahun 1950 menjelaskan jika diuraikan bersama dengan prosedur inversi yang sesuai teori MT bisa menentukan nilai distribusi resistivitas di bawah permukaan bumi dengan kedalaman berkisar antara beberapa puluh meter hingga kilometer (Manoj, 2003).

Dalam metode MT, data yang terukur terkategori menjadi sinyal dan *noise*. Stodt pada tahun 1983 mendefinisikan sinyal sebagai komponen medan listrik dan medan magnet yang terukur dimana komponen tersebut saling berhubungan melalui suatu fungsi transfer impedansi sedangkan *noise* adalah komponen medan listrik atau medan magnet yang tidak saling berhubungan dalam suatu fungsi transfer impedansi tetapi ikut terukur dalam akuisisi (Manoj, 2003). Definisi ini berlaku baik pada tahapan domain waktu maupun frekuensi selama kedua komponennya bekerja sebagai suatu sistem linear. Dalam definisi lain, menurut Madden pada tahun 1964 menyatakan *noise* adalah bagian pada data MT yang tidak dapat terprediksi keterkaitannya dengan sinyal dan berasal dari sumber yang tidak diharapkan (Manoj, 2003). Selain itu, perubahan amplitudo dan fase yang tak dapat diprediksi juga dikenal sebagai *noise*. Pengaruh *noise* pada data MT tentu dapat mempengaruhi nilai *signal to noise ratio* dan kualitas data MT.

Pengaruh *noise* terhadap sinyal pada metode MT sangatlah bervariasi. Aliran kabel listrik (*powerline*) dapat menghasilkan *noise* periodik berupa perubahan amplitudo pada data *time series* dengan frekuensi tertentu. Gangguan ini dapat mempengaruhi data meskipun pengukuran dilakukan hingga mencapai jarak ratusan meter dari aliran *powerline*. *Harmonic powerline noise* ini umumnya dapat dihilangkan dengan menggunakan *notch filter* (Fontes et al., 1988). Gangguan semacam ini juga dapat dihasilkan oleh sistem elektrik dan *traction motor* yang berfungsi untuk menggerakkan kereta, *noise* elektromagnetik yang ditimbulkan oleh

kereta umumnya muncul dalam bentuk *noise* yang mempengaruhi data pada frekuensi 50 Hz dan kelipatannya. *Noise* ini relatif lebih sulit diminimalisir dibandingkan dengan *harmonic powerline noise* yang menimbulkan anomali pada satu pita frekuensi (50 Hz) saja karena komponen yang mengalirkan arus relatif dekat dengan tanah sehingga arus listrik dapat terinduksi ke dalam tanah (Simpson and Bahr, 2005).

Vibrasi yang merambat melalui tanah akibat pergerakan kendaraan dapat menghasilkan *noise* mekanik yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran medan magnet dan medan listrik. Vibrasi ini dapat menggetarkan koil sensor medan magnet sehingga dapat berpotensi merubah *flux* magnetik yang melewati koil. Gangguan semacam ini juga dapat terjadi akibat adanya aktivitas alam seperti angin dan badai yang menggerakkan batang pohon yang kemudian menimbulkan efek vibrasi pada akarnya di dalam tanah (Manoj, 2003).

Untuk mencegah pengaruh *noise* yang merusak data, maka perlu dilakukan upaya untuk meminimalisir pengaruh *noise* terhadap data MT. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melakukan identifikasi terhadap jenis *noise* dan meminimalisir *noise* tersebut pada data *time series* dan *frequency series* dengan menggunakan filter digital dan seleksi data *time series*.

Filter digital dan seleksi data *time series* memberikan hasil yang cukup signifikan dalam proses pengolahan data MT yang terkontaminasi *noise*. Beberapa filter digital yang dapat dilakukan diantaranya *delay line* dan *notch filter* untuk menghilangkan *noise* regular seperti *harmonic powerline noise*, sedangkan *maximum entropy extension* dan *windows deconvolution* untuk menghilangkan *noise* irregular seperti *spike*. Untuk mengeliminasi *noise* yang cukup sulit diatasi dengan menggunakan filter digital, seleksi data *time series* dapat digunakan sebagai alternatif lain untuk mendapatkan kualitas data yang lebih baik (Fontes et al., 1988).

Teknik filterisasi data MT yang dapat meningkatkan kualitas data dan hasil inversi dapat menjadi modal awal untuk pengembangan metode MT kedepan dimana sasaran atau target yang ingin dicari dengan menggunakan metode ini terkadang berada pada zona yang banyak memiliki sumber *noise* mekanik dan elektrik yang dapat memunculkan anomali elektromagnetik. Oleh karena itu, penelitian ini dianggap sangat perlu dilakukan untuk mendapatkan solusi atas

permasalahan ini dimana hasilnya dapat mendukung atau menambahkan acuan dalam penelitian sejenis di masa mendatang.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan berdasarkan perumusan masalah sebagai berikut:

- a. Apa sajakah yang dapat menjadi gangguan (*noise*) pada data magnetotellurik?
- b. Bagaimanakah pengaruh dan cara mengeliminasi *noise* periodik/regular (*harmonic powerline noise*) dan tentatif/irregular (*spike*) dengan filter digital?
- c. Bagaimanakah efektivitas seleksi data *time series* dalam mengeliminasi *random noise*?
- d. Bagaimanakah komparasi hasil pengolahan data magnetotellurik antara sebelum dan sesudah dilakukannya pengelinasian *noise*?
- e. Bagaimana komparasi teknik pemrosesan data yang dilakukan pada penelitian ini dengan software yang sudah ada?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

- a. Mengidentifikasi jenis dan pengaruh *noise* dalam data magnetotellurik.
- b. Melakukan filterisasi data magnetotellurik yang terkontaminasi *noise* periodik/regular (seperti *harmonic powerline noise*) dan tentatif/irregular (seperti *spike*) dengan menggunakan filter digital dan *random noise* dengan menggunakan seleksi data *time series*.
- c. Melakukan komparasi hasil pengolahan data magnetotellurik antara sebelum dan sesudah dilakukannya pengelinasian *noise*.
- d. Melakukan komparasi teknik pemrosesan data yang dilakukan pada penelitian ini dengan software yang sudah ada.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademik maupun secara terapan. Manfaat secara akademik yang diharapkan dari penelitian ini diantaranya:

- a. Memberikan sumbangsih terhadap ilmu pengetahuan di bidang Geofisika, khususnya pengembangan metode magnetotellurik dalam menghasilkan kualitas data yang lebih baik melalui proses pengeliminasian *noise* ditingkat data domain waktu dan frekuensi.
- b. Menguatkan atau mengoreksi hasil penelitian-penelitian terdahulu dengan topik yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini.
- c. Memberikan rekomendasi terhadap penelitian lebih lanjut mengenai proses pengolahan data magnetotellurik yang terkontaminasi *noise* untuk menghasilkan kualitas data yang lebih baik sehingga kesalahan pemodelan dan interpretasi dapat diminimalisir.

Manfaat terapan yang diharapkan dari penelitian ini diantaranya:

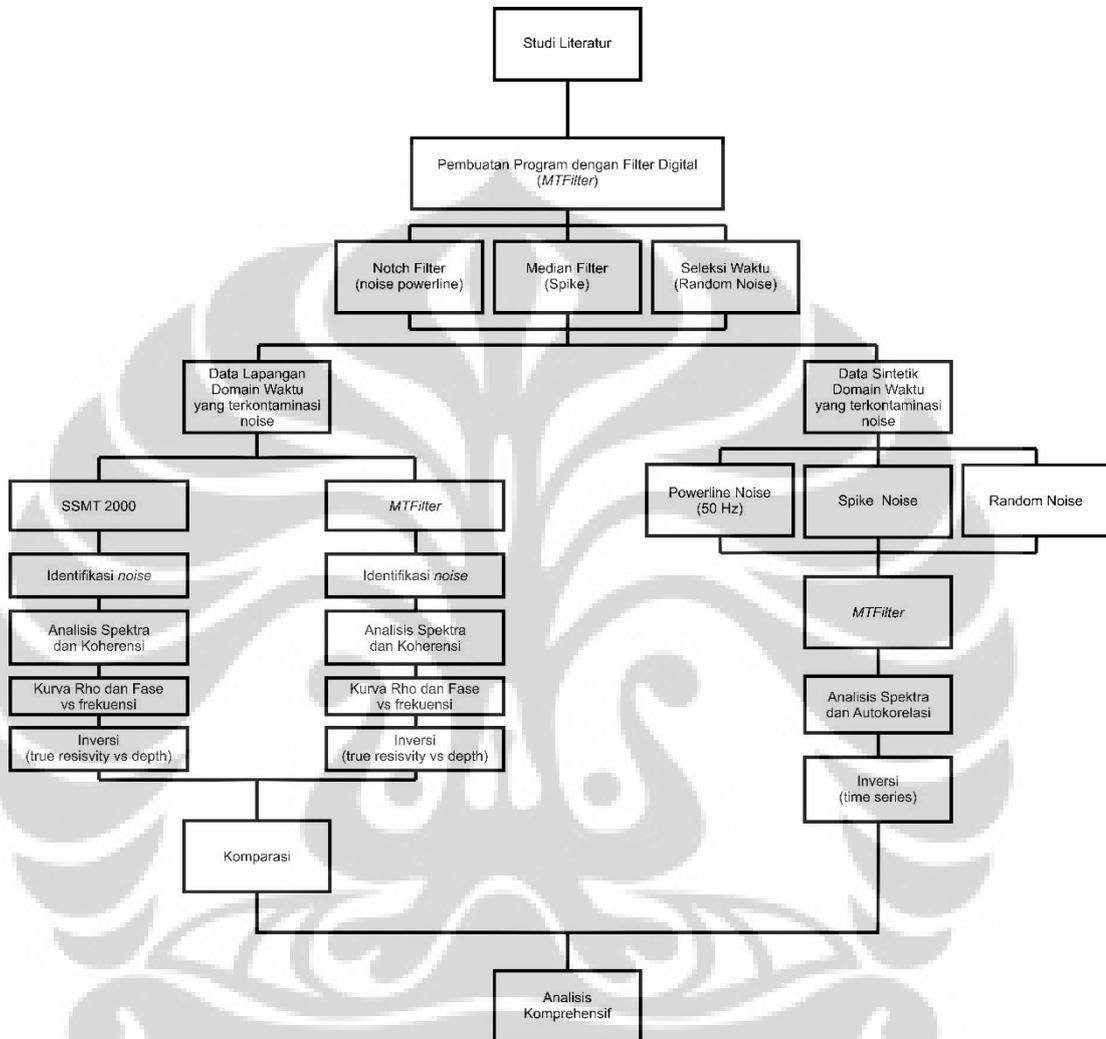
- a. Memberikan informasi bagi para praktisi khususnya geofisikawan mengenai teknik-teknik pengeliminasian *noise* pada data magnetotellurik di tingkat data domain waktu dan frekuensi untuk meminimalisir kesalahan dalam pemodelan dan interpretasi struktur-struktur yang berada bawah permukaan bumi.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada pemrosesan data magnetotellurik yang terkontaminasi *noise* dengan menggunakan filter digital dan seleksi data *time series* dengan menggunakan Program *MTFilter*. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data *time series* sintetik dan data lapangan yang terkontaminasi *noise* regular berupa *harmonic powerline noise 50 Hz*, *noise* irregular berupa *spike*, dan *random noise* baik yang bersifat koheren maupun inkoheren pada komponen medan listrik (E) dan medan magnet (H). Hasil pengolahan data yang diperoleh melalui Program *MTFilter* dikomparasi dengan Software SSMT 2000 (data lapangan yang diambil menggunakan instrumen Phoenix).

1.6 Metode Penelitian

Secara umum, alir pengerjaan dari penelitian tugas akhir ini diilustrasikan melalui Gambar 1. 1 berikut:



Gambar 1. 1. Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur mengenai konsep proses pengolahan data MT, jenis dan sumber *noise* pada data MT pada tingkat domain waktu dan frekuensi, serta metode filterisasi terhadap *noise* tersebut dengan menggunakan filter digital dan seleksi data *time series*. Informasi tersebut dapat diperoleh dari berbagai literatur berupa buku, paper, internet, materi perkuliahan dan hasil diskusi dengan dosen pembimbing, rekan mahasiswa ataupun yang lainnya mengenai materi yang terkait dengan penelitian ini.

Kemudian, penelitian ini dilanjutkan dengan pembuatan program yang memiliki fitur utama filter digital dan seleksi data *time series* menggunakan bahasa pemrograman MATLAB. Program ini dapat melakukan proses *forward modeling* dan *inverse modeling* terhadap data *time series* MT dan proses pengeliminasian *noise* pada tingkat data domain waktu dan domain frekuensi. Program ini diberi nama *MTFilter*. Proses filterisasi melalui program ini dilakukan untuk meminimalisir pengaruh *noise* pada data MT. Program *MTFilter* merupakan pengembangan dari Program *MTPower* yang dapat memproses data MT dari *raw data* hingga menjadi bentuk data resistivitas semu dan fase (Heditama, 2011). Program ini kemudian dikembangkan lagi dengan menambahkan faktor kalibrasi (Dewi, 2012).

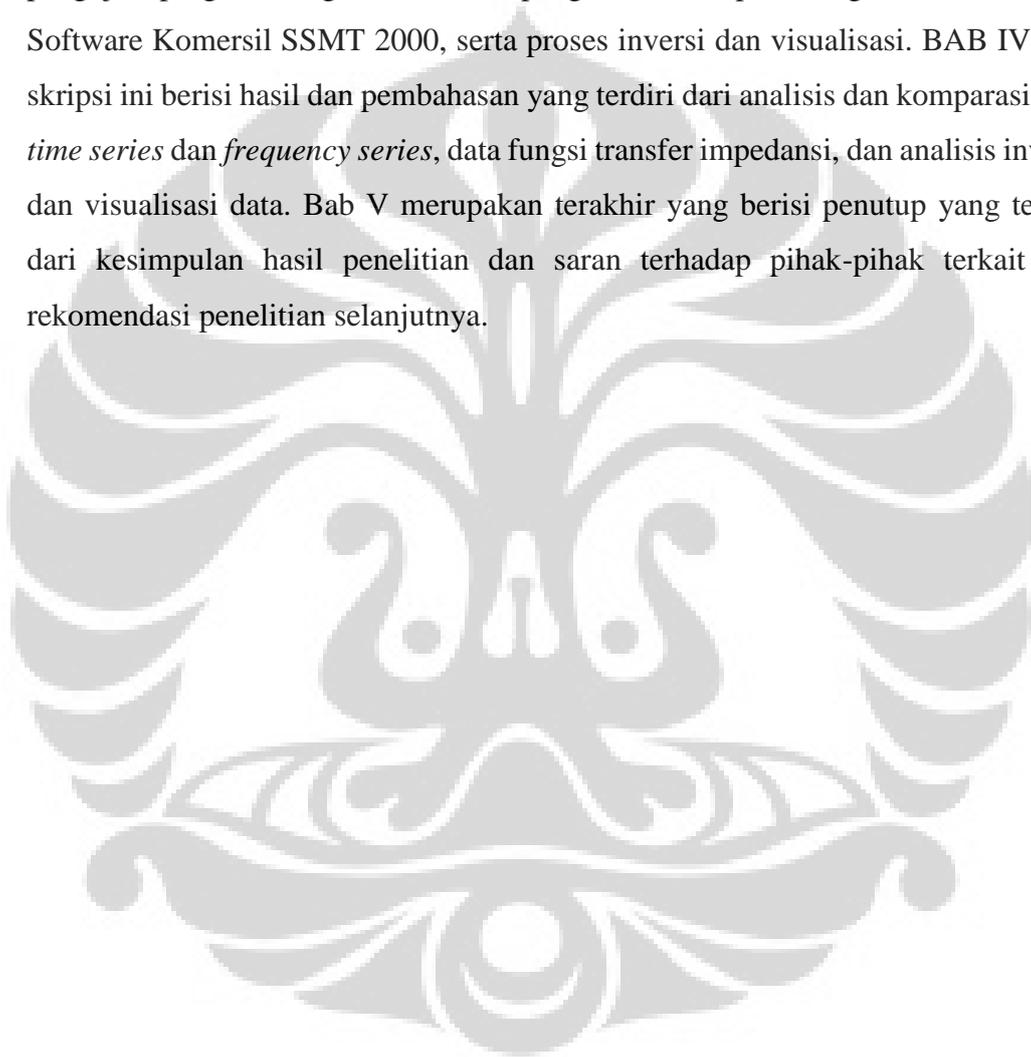
Untuk menganalisis efektivitas program yang telah dibuat dalam meminimalisir pengaruh *noise* pada data MT, maka dilakukan pengujian dengan melakukan pengolahan data sintetik dan data lapangan yang terkontaminasi *noise* regular berupa *harmonic powerline noise* (50 Hz), *noise* irregular berupa *spike* dan *random noise*. Hasil pengolahan data dengan menggunakan program *MTFilter* dengan parameter pengontrol kualitas berupa analisis spektra, autokorelasi, dan inversi transformasi fourier. Analisis power spektrum dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik *noise* regular (50 Hz) yang bersifat periodik dan kualitas data MT domain frekuensi sebelum dan setelah dilakukan proses filter. Autokorelasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh *noise* irregular (*spike*) terhadap kontinuitas dan respon sinyal dalam selang waktu tertentu pada proses pencuplikan data MT. Data yang memiliki nilai *signal to noise ratio* yang tinggi umumnya memiliki nilai autokorelasi yang tinggi pula karena sinyal MT bersifat kontinu. Begitu pula sebaliknya data yang memiliki nilai *signal to noise ratio* yang rendah umumnya memiliki nilai autokorelasi yang rendah karena sinyal terganggu oleh *noise* yang dapat merubah amplitudo data MT *time series* sehingga data hasil cuplikan menjadi tidak kontinu. Inversi dari data domain frekuensi menjadi data domain waktu dilakukan untuk menganalisis perubahan sinyal *time series* sebelum dan sesudah difilterisasi serta komparasinya dengan sinyal sintetik yang dibuat tanpa terkontaminasi *noise*.

Komparasi pada data lapangan dilakukan dengan menganalisis data *time series*, power spektrum, koherensi, kurva resistivitas dan fase terhadap frekuensi atau periode, serta analisis model *true resistivity* terhadap kedalaman melalui proses inversi. Analisis data *time series* dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik, jenis, dan sumber *noise* irregular dan random yang mengkontaminasi data MT. Analisis power spektrum dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik, jenis, dan sumber *noise* reguler yang bersifat periodik pada data MT. Analisis koherensi dilakukan untuk mengetahui keterkaitan antara data sinyal input (medan magnet) dan output (medan listrik) pada domain frekuensi. *Noise* yang bersifat noninduktif, seperti vibrasi, mempengaruhi komponen medan magnet atau medan listrik secara terpisah. Hal ini menyebabkan data yang terkontaminasi *noise* ini umumnya memiliki koherensi yang rendah, begitu pula sebaliknya pada *noise* yang bersifat induktif, seperti aliran listrik bawah tanah, menyebabkan data medan magnet dan medan listrik akan terpengaruhi oleh *noise* yang muncul dalam sistem yang saling berkaitan sehingga koherensi bisa saja menjadi tinggi tetapi tingginya koherensi ini disebabkan oleh induksi dari sumber yang tidak diharapkan. Kurva resistivitas dan fase dalam domain frekuensi atau periode diperoleh melalui fungsi transfer impedansi yang diperoleh dengan membandingkan respon medan listrik (output) terhadap medan magnet (input), *noise* yang mengkontaminasi masing-masing komponen medan listrik dan magnet tentu akan mempengaruhi nilai impedansi sehingga proses analisis perlu dilakukan pada tahap ini. Analisis model hasil inversi dilakukan untuk mengkomparasi model yang dihasilkan dari data yang telah difilter dengan menggunakan *MTFilter* dan software SSMT 2000.

1.7 Sistematika Penulisan

Penelitian ini didokumentasikan dalam bentuk publikasi tertulis berupa dokumen skripsi yang disusun berdasarkan *Pedoman Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia* (Universitas Indonesia, 2008). Pedoman penulisan lain yang tidak tercantum dalam pedoman tersebut disandarkan pada *Pedoman Umum Ejaan Yang Disempurnakan* (Panitia Pengembangan Bahasa Indonesia, 2000). Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari Bab I yang merupakan bab pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah,

tujuan penelitian, metodologi, dan sistematika penulisan. Kemudian, Bab II berisi tentang teori-teori yang menjadi landasan pada penelitian tugas akhir ini meliputi deskripsi mengenai konsep dasar, sinyal dan *noise*, instrumentasi dan prosedur lapangan, serta pengolahan data pada metode magnetotellurik. Selanjutnya, Bab III yang berisi deskripsi pembuatan program dan pengolahan data yang terdiri dari sub bab pembuatan program dengan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB, pengujian program dengan melakukan pengolahan data pada Program MTFilter dan Software Komersil SSMT 2000, serta proses inversi dan visualisasi. BAB IV dari skripsi ini berisi hasil dan pembahasan yang terdiri dari analisis dan komparasi data *time series* dan *frequency series*, data fungsi transfer impedansi, dan analisis inversi dan visualisasi data. Bab V merupakan terakhir yang berisi penutup yang terdiri dari kesimpulan hasil penelitian dan saran terhadap pihak-pihak terkait dan rekomendasi penelitian selanjutnya.



BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Konsep Dasar Metode Magnetotellurik

Metode Magnetotellurik (MT) merupakan suatu teknik eksplorasi pasif yang memanfaatkan rentang frekuensi tertentu dari perubahan medan geomagnetik yang terjadi secara natural sebagai sumber energi yang menginduksi arus *eddy* kedalam bumi. Dengan demikian, metode ini jelas berbeda dengan metode geolistrik aktif yang umumnya menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah sebagai sumber energi untuk proses konduksi listrik. Sejalan dengan hal ini, metode elektromagnetik aktif seperti *Time Domain Electromagnetic (TDEM)* juga menggunakan injeksi arus *eddy* ke dalam tanah secara buatan untuk proses yang sama dengan MT. Akan tetapi, metode magnetotellurik dan geolistrik aktif memiliki sedikit kesamaan dimana parameter fisika yang visualisasikan adalah konduktifitas elektrik batuan.

Metode Magnetotellurik (MT) sebenarnya berkaitan erat dengan metode *Geomagnetic Depth Sounding (GDS)* yang mula-mula dikembangkan pada tahun 1889 oleh Schuster dan Lamb dimana mereka menerapkan teknik perhitungan matematis yang dicetuskan oleh Gauss pada tahun 1839 untuk memisahkan variasi medan magnet yang berasal dari aktivitas interal dan eksternal bumi. Mereka menemukan perubahan signifikan pada medan geomagnetik yang muncul akibat masing-masing proses tersebut. Kemudian, Tikhonov pada tahun 1950 dan Cagniard pada tahun 1953 menemukan bahwa jika medan listrik dan medan magnet yang dihasilkan pada proses tersebut diukur secara simultan, maka rasio kompleks diantara kedua komponen dapat diturunkan menjadi suatu bentuk formulasi yang dapat menggambarkan penetrasi medan elektromagnetik ke dalam bumi. Kedalaman penetrasi medan elektromagnetik ini bergantung pada periode gelombang medan elektromagnetik tersebut dan konduktivitas struktur batuan bumi dimana medan tersebut menginduksi. Hal inilah yang kemudian menjadi dasar dari pengembangan metode magnetotellurik.

2.1.1 Persamaan Maxwell

Konsep fisis mengenai gelombang elektromagnetik yang mendasari metode magnetotellurik adalah Persamaan Maxwell, khususnya dalam persamaan Hukum Ampere dan persamaan Hukum Faraday (Simpson and Bahr, 2005). Persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

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

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

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot D = \eta_f \quad (2.4)$$

Persamaan (2.1) merupakan persamaan Hukum Ampere sedangkan persamaan (2.2) merupakan persamaan Hukum Faraday. Persamaan Hukum Faraday bermakna bahwa variasi medan magnet terhadap waktu akan menginduksi suatu aliran yang berhubungan dengan medan listrik dalam suatu loop tertutup dengan arah yang tegak lurus dengan medan induksi. Sementara itu, persamaan Hukum Ampere bermakna bahwa arus elektrik pada loop tertutup akan berasosiasi dengan medan magnet dimana medan magnet tersebut besarnya akan bergantung dan arahnya tegak lurus dengan total aliran arus. (Simpson and Bahr, 2005). Arus induksi yang dimaksud dikenal sebagai arus *eddy* atau arus *telluric*. Dengan mengasumsikan perubahan arus pergeseran dapat diabaikan $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$ maka medan magnetik hanya akan dihasilkan oleh arus tellurik. Persamaan (2.3) menyatakan bahwa tidak adanya muatan magnetik pada medium. Dalam medium isotropik dua hubungan lain dapat diuraikan dalam persamaan berikut:

$$B = \mu H \quad (2.5)$$

$$D = \varepsilon E \quad (2.6)$$

Dimana dalam Prinsip Magnetotellurik diasumsikan bahwa variasi permeabilitas magnetik (μ) batuan diabaikan nilainya ketika dibandingkan dengan nilai variasi konduktivitas bulk batuan sehingga nilai $\mu = \mu_0$. Asumsi lain yang diterapkan pada metode magnetotellurik adalah muatan medium bersifat konservatif dan seperti konduktor ohmik, sehingga mematuhi persamaan sebagai berikut:

$$j = \sigma E \quad (2.7)$$

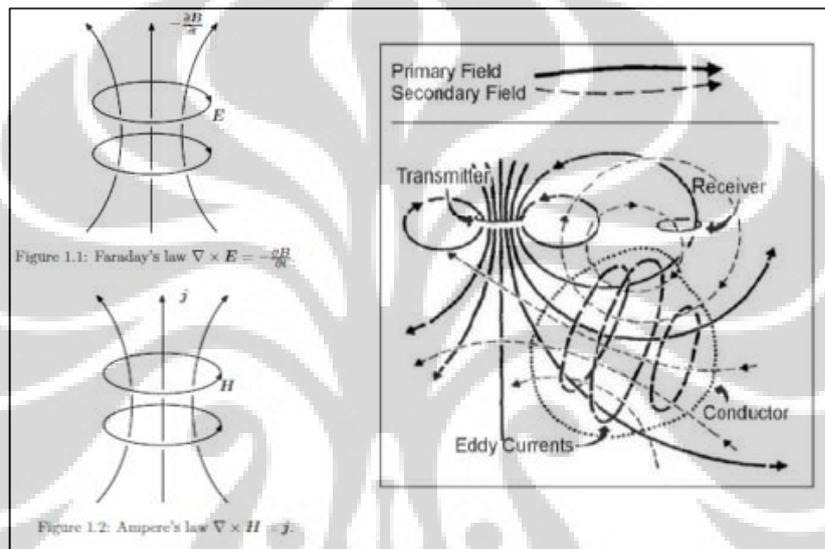
Dimana j adalah total rapat arus (A/m^2), σ adalah konduktivitas medium (S/m) dan E adalah medan listrik (V/m). Dengan demikian, persamaan maxwell dapat diuraikan lebih lanjut menjadi persamaan berikut:

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

$$\nabla \times B = \mu_0 \sigma E \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot E = \eta_f / \varepsilon \quad (2.11)$$



Gambar 2. 1. Konsep Fisis Metode Magnetotelurik (Simpson and Bahr, 2005)

Pada Gambar 2. 1 diilustrasikan perubahan medan magnet primer yang terjadi pada *transmitter* akan menghasilkan induksi yang berkaitan dengan medan listrik berupa *eddy current* atau *telluric current* pada medium konduktor, dalam hal ini konduktor yang dimaksud adalah batuan bumi. Setelah itu, arus induksi yang bervariasi akan menghasilkan medan magnet sekunder dimana kuat medan magnet yang dihasilkan bergantung pada konduktivitas elektrik medium yang terinduksi (Simpson and Bahr, 2005).

2.1.2 Medan Elektromagnetik dan *Skin Depth*

Konsep dasar dari teknik eksplorasi dengan menggunakan metode magnetotelurik dikemukakan oleh Tikhonov pada tahun 1950 dan dikembangkan lebih detail oleh Cagniard pada tahun 1953. Inti dari tesis kedua ahli tersebut adalah

membuktikan respon elektik batuan dari kedalaman yang lebih dalam dapat diperoleh dengan memperbesar periode *sounding* dari pengukuran sinyal MT. Prinsip ini kemudian dituliskan dalam bentuk hubungannya dengan *skin depth* elektromagnetik yang mendeskripsikan peluruhan eksponensial dari medan elektromagnetik sebagaimana gelombang ini terdifusi ketika merambat melalui suatu medium.

$$p(T) = \sqrt{\frac{T}{\pi\mu\bar{\sigma}}} \quad (2.12)$$

Dimana $p(T)$ merupakan *skin depth* elektromagnetik dengan satuan meter dalam fungsi periode (T). $\bar{\sigma}$ merupakan nilai rata-rata konduktivitas dari suatu medium yang dipenetrasi dan μ merupakan permeabilitas magnetik. Pada suatu kedalaman tertentu, amplitudo gelombang medan elektromagnet akan teratenuasi dalam fungsi eksponensial. Peluruhan secara eksponensial dari medan elektromagnetik ini sebanding dengan meningkatnya kedalaman yang membuat gelombang tersebut menjadi insensitif terhadap konduktivitas struktur yang menghampar lebih dalam dari $p(T)$. Oleh karena itu, dalam metode MT, *skin depth* elektromagnetik umumnya dikenal juga sebagai kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik yang merambat ke dalam bumi. Dalam metode magnetotellurik, seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa μ biasanya diasumsikan mendekati nilai permitivitas pada ruang hampa μ_0 yang nilainya sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, sehingga persamaan $p(T)$ dapat dituliskan dalam bentuk sebagai berikut.

$$p(T) \approx 500\sqrt{T\rho_a} \quad (2.13)$$

Dimana ρ_a adalah resistivitas semu atau resistivitas rerata suatu *equivalent uniform half-space*.

Dari penjelasan diatas, kita dapat menarik kesimpulan bahwa untuk suatu periode *sounding*, kedalaman tertentu dari suatu medium konduktif dapat dicapai oleh gelombang elektromagnetik natural yang dipengaruhi oleh konduktivitas rerata medium dibawah permukaan yang dipenetrasi oleh gelombang tersebut. Medan elektromagnetik yang diinduksi secara natural kedalam bumi dan dapat dimanfaatkan dalam metode MT memiliki periode gelombang yang terentang dari 10^3 s.d. 10^{-5} s. Kemudian apabila kita mengasumsikan rata-rata resistivitas dari batuan di kerak bumi dan bagian atas mantle (astenosfer) sebesar $100 \Omega\text{m}$, kita

dapat melihat bahwa kedalaman batuan yang kemungkinan dapat terdeteksi terentang mulai kedalaman 160 m hingga 500 km (Simpson and Bahr, 2005).

2.1.3 Tensor Impedansi

Medan listrik dan medan magnet yang diukur pada suatu titik *sounding* tertentu dapat dihubungkan melalui suatu fungsi transfer yang berbentuk persamaan tensor impedansi kompleks (Z). Persamaan tensor impedansi tersebut dapat diuraikan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$E(\omega) = Z(\omega)H(\omega) \quad (2.14)$$

$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Secara linear persamaan diatas juga dapat diuraikan sebagai berikut:

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.16)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.17)$$

Dalam proses pengolahan data tensor impedansi dapat diasumsikan dalam bentuk model medium batuan satu dimensi, dua dimensi, dan tiga dimensi. Model satu dimensi mengasumsikan bahwa nilai konduktivitas batuan hanya bervariasi pada arah vertikal saja (z) sedangkan arah horizontalnya (x dan y) dianggap homogen. Model dua dimensi mengasumsikan bahwa nilai konduktivitas batuan bervariasi pada arah vertikal (z) dan salah satu komponen horizontal. Sedangkan, model tiga dimensi mengasumsikan bahwa nilai konduktivitas batuan bervariasi pada semua komponen (x , y , dan z). Tentu saja secara intuitif model tiga dimensi yang paling sesuai dengan kondisi batuan sesungguhnya di lapangan. Namun, untuk berbagai tujuan asumsi model satu dan dua dimensi masih digunakan dalam proses eksplorasi.

a. Asumsi Model Satu Dimensi

Kita asumsikan bumi terdiri dari lapisan horizontal, di mana konduktivitas σ hanya berubah terhadap kedalaman sepanjang sumbu z . Masing-masing lapisan memiliki komponen energi ke bawah dan ke atas. Komponen x medan listrik E pada lapisan ke- n dapat dinyatakan dengan:

$$E_{xn} = a_n(k_n, \omega)e^{-k_n z} + b_n(k_n, \omega)e^{+k_n z} \quad (2.18)$$

Medan magnet pada arah y sama dengan:

$$B_{yn} = \frac{k_n}{i\omega} E_{xn} \quad (2.19)$$

Sehingga fungsi transfer C pada lapisan ke- n adalah:

$$C_n = \frac{E_{xn}(z)}{i\omega B_{yn}(z)} \quad (2.20)$$

Wait pada tahun 1954 mencatat bahwa fungsi transfer bias diketahui secara analitik untuk masing-masing lapisan. Dimulai dari lapisan paling bawah N yang sama dengan *half-space* homogen (Simpson and Bahr, 2005). Formula rekursif Wait menghitung masing-masing lapisan yang bersesuaian pada lapisan ke- n teratas:

$$C_n(Z_{n-1}) = \frac{1}{k_n} \left(\frac{k_n C_{n+1}(Z_n) + \tanh[k_n(Z_n - Z_{n-1})]}{1 + k_n C_{n+1}(Z_n) + \tanh[k_n(Z_n - Z_{n-1})]} \right) \quad (2.21)$$

Apparent resistivity ρ_a dari media yang berlapis dinyatakan dalam bentuk fungsi transfer kompleks C

$$\rho_a(\omega) = |C(\omega)|^2 \mu_0 \omega \quad (2.22)$$

Oleh karena itu fase ϕ dinyatakan sebagai arkustangen dari rasio bagian imajiner dan real dari C :

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Re C}{\Im C} \right) \quad (2.23)$$

Apparent resistivity dan fase merupakan pasangan yang memiliki hubungan sebab akibat menurut hubungan dispersi Weidelt yang juga dikenal sebagai hubungan Kramers-Kronig.

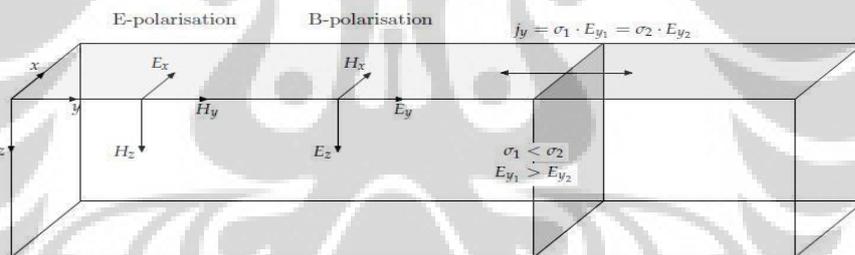
$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{4} - \frac{\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\omega'^2 - \omega^2} \log \frac{\rho_a(\omega')}{\rho_0} d\omega' \quad (2.24)$$

Jadi, fase dari *half-space* homogen atau lapisan bumi selalu bisa dihitung dari *apparent resistivity* kecuali untuk faktor skala ρ_0 . Faktor skala memainkan peran penting dalam distribusi konduktivitas multidimensi, yang menyebabkan *apparent resistivity* menjadi bergeser tak teratur. Persamaan (1.24) menggambarkan bahwa fase untuk sebuah frekuensi ω bergantung pada *apparent resistivity* untuk semua frekuensi ω' , dengan pengaruh $\rho_a(\omega')$ paling besar untuk $\omega = \omega'$. Sehingga, fase mengantisipasi perilaku *apparent resistivity* terhadap periode, tapi tidak dapat

mengetahui posisi absolutnya. Dalam situasi multidimensi, hubungan dispersi memiliki penyesuaian dengan dimensi bawah permukaan (Simpson and Bahr, 2005).

Dalam model dua lapisan fase akan di atas 45° jika lapisan yang di atas kurang konduktif dibandingkan dengan lapisan di bawahnya. Demikian pula, fase akan kurang dari 45° jika lapisan di atas yang lebih konduktif. Untuk bumi dengan n lapisan, kurva *apparent resistivity* berperilaku asimtotik terhadap lapisan terdangkal dan terdalam pada kedua ujung rentang periode. Resolusi lapisan yang berada di tengah sangat bergantung dari ketebalan dan *resistivity*-nya, dan tidak dapat ditentukan. Selanjutnya, lapisan konduktif lebih mudah dideteksi daripada lapisan resistif (Simpson and Bahr, 2005). Jika ρ_1 dan ρ_2 adalah lapisan *resistivity*, resolusi lapisan resistif adalah $\sqrt{\rho_1^2 / \rho_2^2}$ kali daripada lapisan konduktif. Ini seharusnya juga disebutkan bahwa seluruh informasi tentang perlapisan bumi terkandung dalam medan listrik (E).

b. Asumsi Model Dua Dimensi



Gambar 2. 2. Model Bumi Dua Dimensi pada Metode Magnetotellurik (Fahmi, 2013)

Gambar di atas merupakan ilustrasi model resistivity bumi 2-D dengan variasi resistivity sepanjang sumbu- y . Secara geologi, batas resistivity dapat berupa patahan maupun dike. Pada daerah perbatasan, arus listrik harus memenuhi sifat kontinuitas sesuai hukum Ohm.

$$j_{y1} = \sigma_1 \cdot E_{y1} = \sigma_2 \cdot E_{y2} = j_{y2} = \text{konstan} \quad (2.25)$$

Diskontinuitas resistivitas pada model di atas menyebabkan adanya lompatan atau perbedaan medan listrik pada daerah batas, sementara medan listrik untuk komponen x dan z tetap konstan. Akan tetapi, daerah batas ini tidak mempengaruhi

medan magnet karena diasumsikan permeabilitas magnetiknya homogen. Dengan adanya perbedaan tersebut, maka metode MT dipisah menjadi 2 mode, yaitu TE (*Transverse Electric*) yang merujuk pada polarisasi medan listrik and TM (*Transvere Magnetic*) yang merujuk pada polarisasi medan magnetik.

Mode TE dideskripsikan dalam persamaan-persamaan berikut :

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial y} &= \frac{\partial B_z}{\partial t} = i\omega B_z \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} &= \frac{\partial B_y}{\partial t} = i\omega B_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} &= \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu_0 \sigma E_x\end{aligned}\tag{2.26}$$

Diskontinuitas dari medan listrik tak diperhitungkan karena tidak ada persamaan yang mengandung variable E_y .

Sedangkan mode TM dapat dideskripsikan dalam persamaan-persamaan berikut :

$$\begin{aligned}\frac{\partial B_x}{\partial y} &= \mu_0 \sigma E_z \\ \frac{\partial B_x}{\partial z} &= \mu_0 \sigma E_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= i\omega B_x\end{aligned}\tag{2.27}$$

Jika ditinjau dari persamaan $q_a(\omega) = |C(\omega)|^2 \mu_0 \omega$, maka resistivitas semu merupakan fungsi dari $(\sigma_2 / \sigma_1)^2$.

Dilihat dari gambar pemodelan 2-D di atas, polarisasi medan magnetik atau mode TM memiliki komponen E_y sehingga resolusi resistivitaas secara lateral relatif tajam akibat adanya perubahan medan listrik. Akan tetapi pada daerah batas, resistivitas akan sangat rendah pada daerah yang memiliki resistivitas yang sangat rendah dan akan sangat tinggi pada daerah yang memilki resistivitas tinggi. Oleh karena itu polarisasi medan listrik atau mode TE lebih stabil untuk mengestimasi resistivitas semu.

Ketika akuisisi data MT, maka akan sangat jarang koordinat pengukuran tepat tegak lurus atau sejajar dengan strike. Sehingga tensor impedansi MT (Z') perlu dirotasikan dengan R .

$$Z' = \begin{pmatrix} Z'_{xx} & Z'_{xy} \\ Z'_{yx} & Z'_{yy} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} R^T = RZ_{2D}R^T \quad (2.28)$$

Dengan faktor rotasi R berupa

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Mengacu pada persamaan mode TM, maka hubungannya antara medan magnet dengan dengan vektor tipper adalah

$$T = (T_{zx}, T_{zy}) \quad (2.30)$$

$$B_z = T_{zx} B_x + T_{zy} B_y \quad (2.31)$$

Persamaan di atas hanya berlaku untuk lapisan dengan variasi lateral (sumbu- x atau y). Sementara untuk lapisan sedimen yang berlapis secara vertikal, transfer tippernya bernilai nol akibat tidak adanya anomaly B_z .

c. Asumsi Model Tiga Dimensi

Untuk model bumi tiga dimensi nilai konduktivitas bervariasi ke segala arah (x, y, z) sehingga tensor impedansinya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Z' = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Tabel 2. 1. Komparasi Tensor pada Model Bumi 1, 2, dan 3 Dimensi
(www.digital.library.adelaide.edu.au)

	Dimensionality		
	1-D	2-D	3-D
tensor components	$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ $Z_{xy} = -Z_{yx}$	$Z_{xx} = -Z_{yy}$ $Z_{xy} \neq -Z_{yx}$	$Z_{xx} \neq -Z_{yy} \neq Z_{xy} \neq Z_{yx}$
impedance tensor Z	$\begin{pmatrix} 0 & Z_n \\ -Z_n & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & Z_{ } \\ Z_{\perp} & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}$

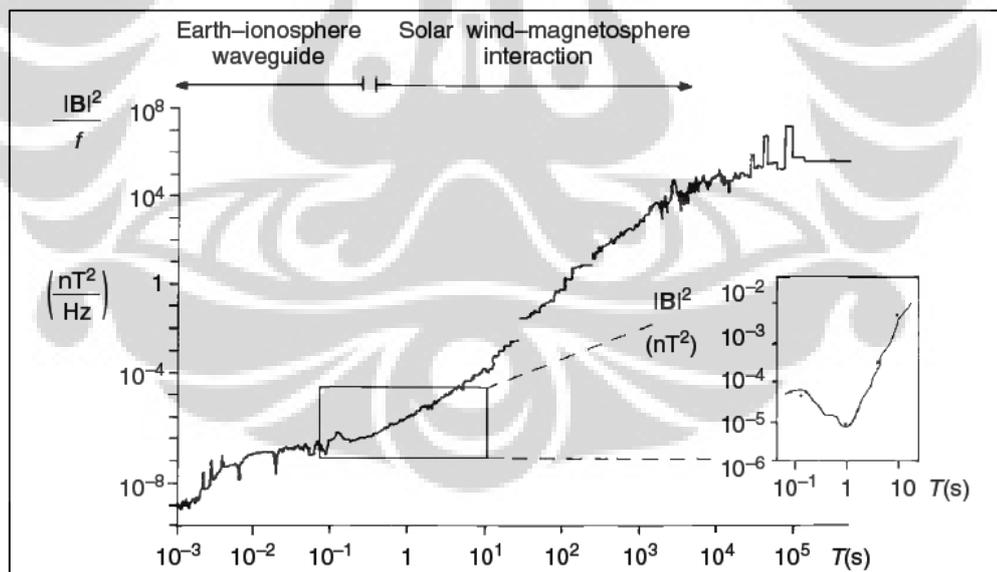
Dimana semua elemen dalam tensor impedansi tersebut merupakan faktor *non-zero element* yang tidak dapat diabaikan.

2.2 Sinyal dan *Noise* pada Metode Magnetotellurik

2.2.1 Sumber dan Karakteristik Sinyal Magnetotellurik

Metode magnetotellurik menggunakan medan elektromagnetik yang muncul secara natural sebagai sumber. Keuntungan menggunakan medan natural sebagai sumber adalah ketersediaan energi yang tidak terbatas untuk menghasilkan gelombang pada rentang periode yang menjadi perhatian (10^3 s.d. 10^{-5} s). Namun, ketergantungan terhadap sumber natural berarti membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan data yang cukup dari pengukuran di lapangan karena sumber gelombang natural sulit diprediksi dan mudah terinterferensi oleh gangguan (*noise*) terutama pada frekuensi yang mendekati nilai 0.1 hingga 1 Hz.

McPerron pada tahun 2005 menyatakan bahwa sumber gelombang MT disebabkan oleh aktivitas magnetohidrodinamik dalam inti luar bumi yang berfase fluida yang menghasilkan medan geomagnet. Perubahan medan geomagnet yang diakibatkan pengaruh eksternal seperti badai petir dan interaksi dengan angin surya menjadi fokus utama dalam metode MT (Simpson and Bahr, 2005). Pengaruh dan karakteristik keduanya dijabarkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 3. Sinyal pada Metode MT (Manoj, 2003)

Grafik diatas merupakan grafik power spektra dalam fungsi periode dari variasi medan geomagnet yang ditimbulkan oleh pengaruh aktivitas meteorologi dilapisan ionosfer dan angin mata yang berinteraksi dengan lapisan magnetosfer

bumi. Nilai power spektra dari variasi geomagnet ini mengalami penurunan amplitudo pada rentang frekuensi 0.5 s.d. 5 Hz dan semakin melemah ketika mendekati frekuensi 1 Hz hal ini terjadi karena sumber yang satu lebih efektif pada nilai diatas 1 Hz sedangkan yang satunya lebih efektif pada nilai frekuensi dibawah 1 Hz. Rentang nilai ini dapat menurunkan kualitas data dan dikenal sebagai deadband.

Selain kedua sumber tersebut aktivitas lain yang dapat memicu induksi medan magnet pada lapisan ionosfer dan magnetosfer juga turut berpengaruh dalam akuisisi. Pengaruh-pengaruh lain tersebut digambarkan sebagai berikut.

Tabel 2. 2. Jenis-Jenis Sinyal MT (Manoj, 2003)

1. Irregular variations	Abbr.	Period/Freq.	B [nT]	Source location
high frequent emission and whistler spherics	VLF	10 μ s-1 ms 3 kHz	\ll 0.1	magnetosphere, lighting
low frequent emissions and atmospherics	ELF ULF	3 kHz-1 Hz >1 s	<0.1	atmosphere, lighting
SCHUMANN resonance		5/39 s ...	<0.1	wave guide earth-ionosphere
continuous pulsations	pc1-5	0.2-600 s		magnetosphere
irregular pulsations	pi1-2	1-150 s		..
solar flare effects	sfe	10 min	10	ionosphere, D&E layer
sudden storm commencement	ssc	2-5 min	10-100	magnetosphere
polar sub storm without recovery phase	bay	30-120 min	20-100	ionosphere of the auroral zone
polar electrojet	PEJ	30-120 min	20-100	magnetosphere
polar magnetic storm with recovery phase	DP (PEJ)	5-120 min 5-120 min	20-100 20-100
recovery phase of polar magnetic storms	Dst DS	3 d 1 d	100 100	ring current ring current
equatorial electrojet	EEJ	all freqs.		ionosphere at equator
2. Regular variations	Abbr.	Period/Freq.	B [nT]	Source location
solar daily variation - on quiet days	S Sq	1 d 1 d	20 20	E-layer in ionosphere ..
lunar daily variation	L	1 d	2	E-layer in ionosphere
semianual variation		6 months	5	ring current
annual variation		1 a	5	ionosphere
sunspot cycle variation		11 a	20	ring current

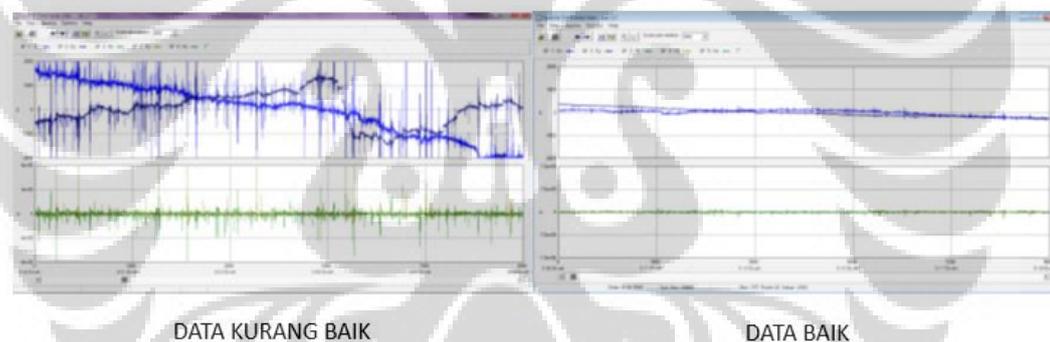
Medan elektromagnet dengan frekuensi diatas 1 Hz kita ketahui berasal dari aktivitas meteorologi seperti lecutan petir. Signal yang dihasilkan lecutan petir tersebut dikenal sebagai sferics. Sferics merambat dalam gelombang pandu sebagai gelombang transverse electric (TE), transverse magnetic dan transverse electric magnetic (TEM) yang dapat terkuatkan atau terlemahkan, tergantung frekuensi.

Pada saat siang hari gelombang pandu memiliki panjang berkisar 60 km sedangkan pada waktu malam hari meningkat menjadi 90 km dan mencapai puncaknya pada waktu sore hari.

Variasi medan magnetik terbesar terjadi pada saat badai magnetik dimana aktivitas ini dapat disebabkan banyaknya plasma matahari yang terlepas dan menyebabkan terjadinya perubahan medan magnetik bumi yang sporadis. Biasanya badai magnetik terjadi selama beberapa hari. Pada saat terjadinya badai matahari proses akuisisi MT dianjurkan untuk tidak dilakukan.

2.2.2 Sumber dan Karakteristik *Noise* yang Mengkontaminasi Sinyal Magnetotellurik

Dalam metode MT nilai medan elektromagnetik yang berasal dari sumber yang telah dijelaskan diatas dinamakan signal. Sedangkan nilai medan elektromagnetik lain yang ikut terukur oleh instrumen dinamakan *noise*.

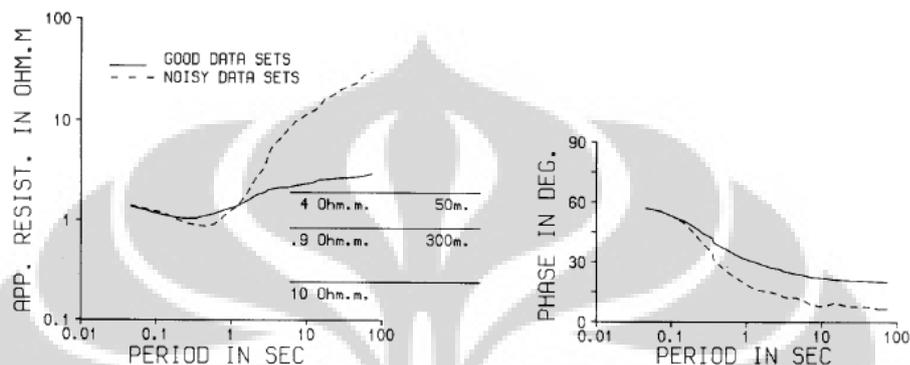


Gambar 2. 4. Determinasi Kualitas Data MT (Daud, 2014a)

Stodt pada tahun 1983 mendefinisikan sinyal sebagai komponen medan listrik dan medan magnet yang terukur dimana komponen tersebut saling berhubungan melalui suatu fungsi transfer sistem linear multi input multi output. Sedangkan, *noise* adalah komponen medan listrik atau medan magnet yang tidak saling berhubungan namun ikut terukur dalam akuisisi. Definisi berlaku baik pada tahapan domain waktu maupun frekuensi selama kedua komponen nya bekerja sebagai suatu sistem linear. Dalam definisi lain menurut Madden pada tahun 1964 *noise* adalah bagian data pada MT yang tidak dapat terprediksi dan mengikuti trend sinyal. Selain itu perubahan amplitude dan fase yang tak dapat diprediksi juga

dikenal sebagai *noise*. Pengaruh *noise* pada data MT tentu dapat mempengaruhi nilai *signal to noise ratio* dan kualitas data MT.

Pengaruh data hasil akuisisi diatas dapat berpengaruh signifikan terhadap nilai fungsi tranfer. Pengaruh ini direpresentasikan dengan munculnya trend data yang tidak sesuai dengan keadaan geologis yang kemungkinan ada.



Gambar 2. 5. Trend kurva resistivitas (kiri) dan fase (kanan) dari data baik dan kurang baik (Fontes et al., 1988)

Pengaruh *noise* pada data sinyal MT sangatlah bervariasi. *Harmonic powerline noise* dan aliran fluida konduktif, seperti sungai dapat memberikan gangguan periodik berupa perubahan amplitude gelombang.

Banyak jenis *noise* lainnya yang dapat mengganggu pada data MT. Untuk mengetahui cara menghilangkan pengaruh *noise* tersebut, kita perlu mengetahui terlebih dahulu jenis-jenis *noise* yang umumnya muncul dan pengaruhnya terhadap data MT. Jenis-jenis *noise* yang muncul pada data MT dikategorikan berdasarkan berbagai jenis parameter, diantaranya sumber *noise*, karakter *noise* pada data MT dan lain sebagainya.

Beberapa klasifikasi *noise* yang dikemukakan pada ahli diantaranya diuraikan sebagai berikut.

Tabel 2. 3. Klasifikasi *Noise* pada Data MT Berdasarkan Pengaruhnya (Simpson and Bahr, 2005)

Cultural Noise	Meteorological	Sensor
Electricity Powerline, Automobile, Railways, Generator, etc	Wind, Strom, lightning, temperature	White noise, temperature

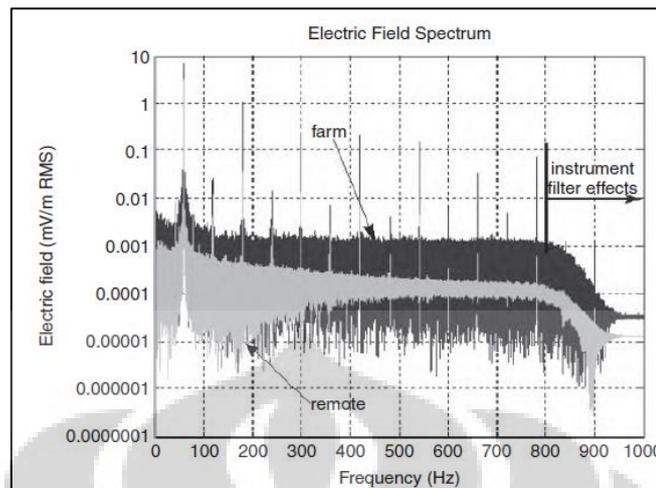
Tabel 2. 4. Klasifikasi *Noise* Pada Data MT Berdasarkan Sumbernya (Manoj, 2005)

MAN MADE			NATURAL
ACTIVE	PASIVE	INSTRUMENT	
Electric power transmission, Electrified Raillines, Electric switching, Factories, Vehicle movement.	Conductors: power lines, Pipelines, Fences, Large iron structures Resistors: Roads, ditches, Culverts	Failure in electronics, Sensor malfunctioning, Dropped bits, Sensor misalignment, muted traces.	Magnetic storms, Lightning, Microseisms, Wind, Equatorial electrojet.

Tabel 2. 5. Klasifikasi *Noise* pada Data MT Berdasarkan Pengaruhnya Dalam Waktu Tertentu (Fontes et al., 1988)

TIME DOMAIN				FREQUENCY DOMAIN
REGULAR		IRREGULAR		
COHERENT (Random Noise, Linear Trend)	NON COHERENT (repeating pulse)	COHERENT (Spike)	NON COHERENT (Spike)	(50-60 Hz, Dead Band)

Sumber *noise* elektromagnetik yang paling mengkontaminasi data hasil survey MT adalah *harmonic powerline noise* yang timbul akibat sistem transmisi dan distribusi arus listrik AC. *Harmonic powerline noise* umumnya berpengaruh pada amplitudo sinyal pada frekuensi 50 atau 60 Hz dan kelipatan bilangan bulatnya. Gangguan pada frekuensi yang sama juga dapat dihasilkan oleh generator atau kereta listrik tapi *noise* yang ditimbulkan oleh generator dan kereta listrik ini relatif lebih sulit diminimalisir dibandingkan dengan *harmonic powerline noise* biasa karena komponen yang mengalirkan arus listrik terlalu dekat dengan tanah sehingga arus dapat berpotensi terinduksi kedalam tanah.



Gambar 2. 6. *Harmonic Harmonic Powerline Noise* pada Spektrum Frekuensi (Chave and Jones, 2012)

Kebanyakan sistem transmisi listrik AC adalah sistem tiga fase dimana konduktor membawa sinyal yang dipisahkan oleh mekanisme *one-third cycle*. Dalam sistem tegangan rendah, kadang ada juga garis netral pada aliran tersebut. Sistem yang seimbang secara sempurna, arus fase berjumlah nol, karenanya medan elektromagnetik yang dihasilkan saling menghilangkan satu sama lain, dan tidak akan ada *noise* elektromagnetik aktif yang dihasilkan didalam bumi (Szarka, 1988).

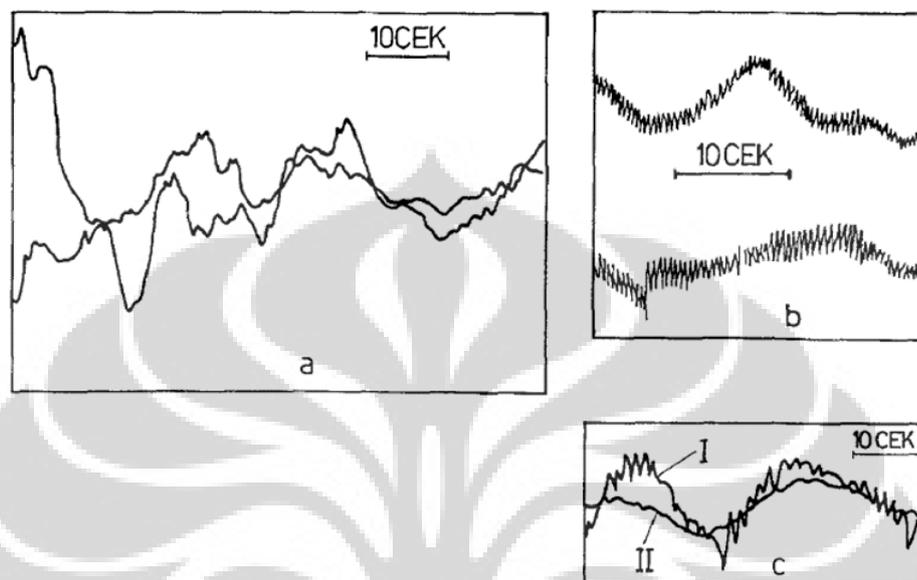
Idealnya bentuk gelombang tegangan dan arus listrik tidak mengandung harmonisa dan hanya memiliki satu frekuensi dasar saja, frekuensi 0 Hz untuk tegangan dan arus DC, dan frekuensi 50 atau 60 Hz untuk tegangan dan arus AC. Akan tetapi, karena penggunaan beban non-linier, bentuk gelombang tegangan dan arus listrik menjadi tidak sama. Parameter besarnya harmonisa sering dinyatakan dengan THD (*Total Harmonic Distortion*).

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2.33)$$

Semakin banyak penggunaan peralatan elektronika (beban non-linier), seperti komputer, TV, dan lain sebagainya (termasuk alat penghemat daya/energi) maka menyebabkan arus listrik semakin mengandung harmonisa.

Gangguan akibat pergerakan kendaraan dapat menghasilkan gangguan medan listrik dan magnet akibat vibrasi yang dirambatkan melalui tanah. Vibrasi ini dapat

menggetarkan koil sensor magnetik yang dapat berpotensi merubah flux magnetik yang melewati koil. Gangguan semacam ini juga dapat terjadi akibat adanya aktivitas meteorologi seperti angin dan badai.



Gambar 2. 7. a. *Noise* Akibat Aktivitas Industrial b. *Noise* Akibat Aktivitas Kendaraan c. *Noise* Akibat Angin Yang Menggetarkan Pohon (Szarka, 1988)

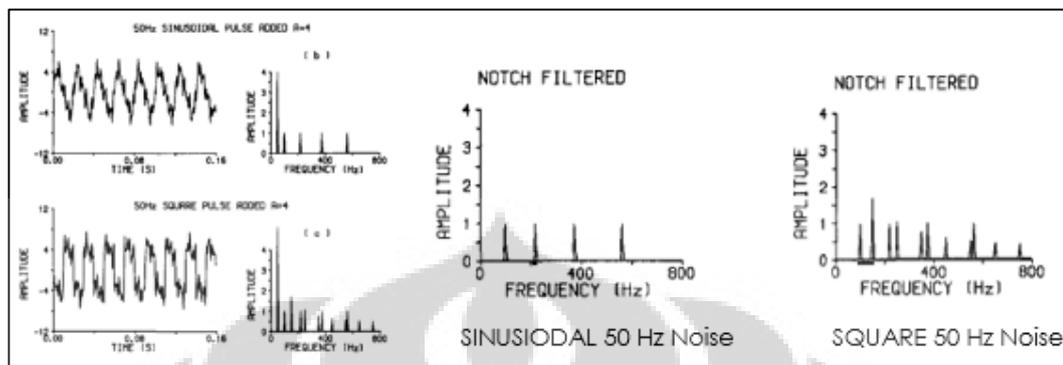
Gangguan akibat pergerakan kendaraan dapat menghasilkan *noise* medan magnet akibat vibrasi yang dirambatkan melalui tanah. Vibrasi ini dapat menggetarkan koil sensor magnetik yang dapat berpotensi merubah *flux* magnetik yang melewati koil. Gangguan semacam ini juga dapat terjadi akibat adanya aktivitas meteorologi seperti angin dan badai yang menggerakkan batang pohon yang kemudian menimbulkan efek vibrasi pada akarnya didalam tanah (Manoj, 2003).

Vibrasi yang dapat menyebabkan magnetik sensor atau kabel elektrik berisolasi. Perubahan koil magnetik sekitar 0.002° menyebabkan perubahan medan magnet sebesar 1 nT dan 1 meter kabel elektrik yang bervibrasi 1 Hz dengan amplitudo 1 mm dapat menyebabkan perubahan $0.5 \mu\text{V}$ (Manoj, 2003).

2.2.3 Teknik Pengeliminasi *Noise* pada Data Magnetotellurik

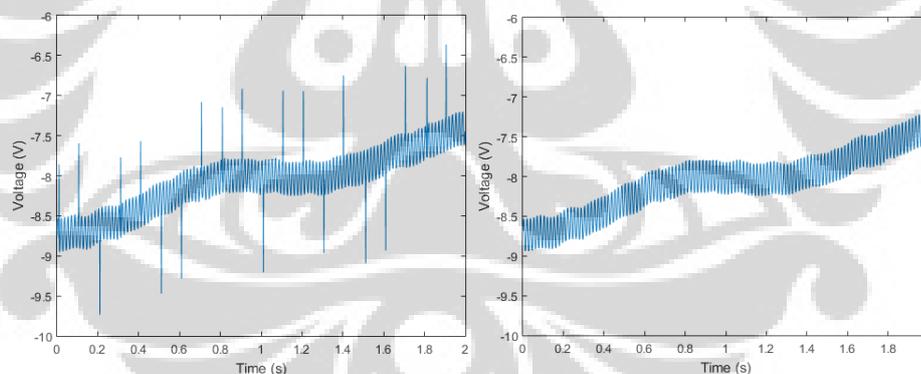
Untuk mencegah pengaruh *noise* yang merusak data ini, maka perlu dilakukan upaya untuk meminimalisir pengaruh *noise* terhadap data MT. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melakukan identifikasi terhadap jenis *noise* dan

meminimalisir *noise* tersebut dalam pada data *time series* dan *frequency series* dengan menggunakan filter digital dan seleksi data *time series*.



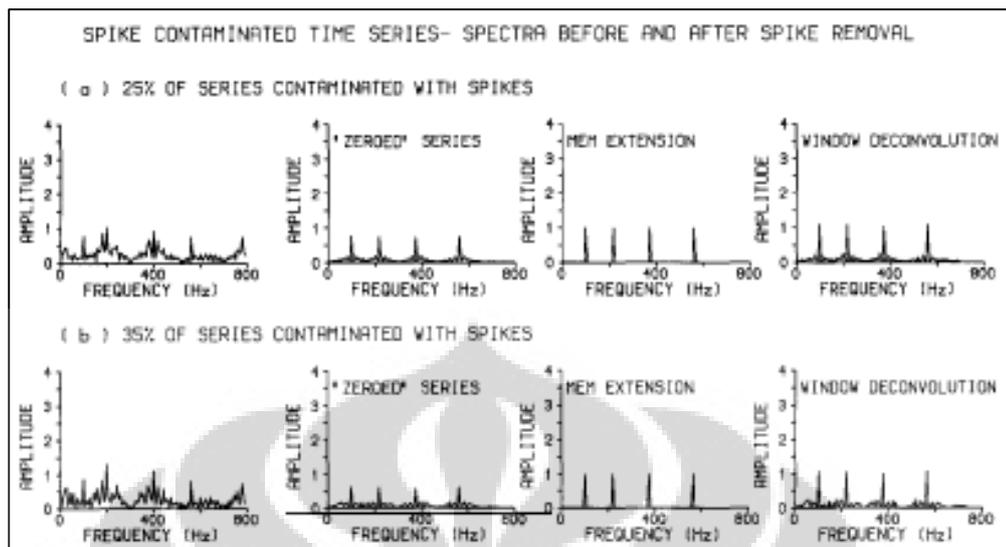
Gambar 2. 8. *Notch Filter* sebagai Pengeliminasi *Harmonic Powerline Noise* (Fontes et al., 1988)

Filter digital dan seleksi data *time series* memberikan hasil yang cukup signifikan dalam proses pengolahan data MT yang terkontaminasi *noise*. Beberapa filter digital yang dapat dilakukan diantaranya *delay line* dan *notch filter* untuk menghilangkan *noise* regular seperti poweline.



Gambar 2. 9. Media Filter untuk Menghilangkan *Spike Noise*. Sinyal sebelum difilter (kiri) dan Setelah Difilter (kanan) (Tan, 2008)

Maximum entropy extension, *median filter*, dan *windows deconvolution* untuk menghilangkan *noise* irregular seperti *spike*. Untuk mengeliminasi *noise* irregular yang cukup sulit diatasi dengan menggunakan filter digital, seleksi data *time series* dapat digunakan sebagai alternatif lain untuk mendapatkan kualitas data yang lebih baik (Fontes et al., 1988).



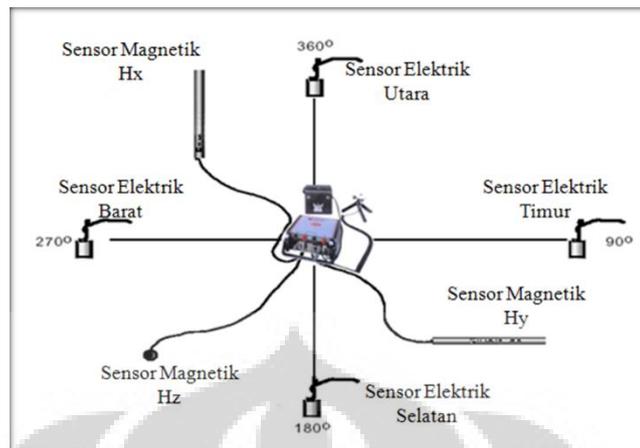
Gambar 2. 10. *Maximum Entropy Extension* dan *Windows deconvolution* untuk Menghilangkan *Spike Noise* (Fontes et al., 1988)

Median filter memiliki karakteristik yang hampir sama dengan *moving average filter*, tapi perbedaannya dengan *moving average* pada saat pemrosesan data filter ini akan mengambil nilai median dari distribusi data. *MEM extension* dan *window deconvolution* memanfaatkan karakteristik dari ketidakteraturan data sebagai suatu fungsi statistik yang kemudian proses filterisasi dilakukan berdasarkan suatu nilai entropi (ketidakteraturan) yang paling kemudian menkonvolusikannya dengan suatu fungsi *window* tertentu.

2.3 Instrumen dan Prosedur Lapangan

2.3.1 Sensor Medan Listrik dan Medan Magnet

Dalam akuisisi data MT instrumen yang digunakan umumnya terdiri dari poros pot sebagai sensor medan listrik, koil magnetik sebagai sensor medan magnet, main unit sebagai pusat operasi dan penyimpanan data serta akumulator sebagai sumber daya. Pengukuran data MT umumnya dilakukan selama 12-16 jam yang dimulai pada siang hari menjelang sore.



Gambar 2. 11. Konfigurasi Akuisisi Data MT (Daud, 2014b)

Dua buah dipole dibutuhkan untuk memastikan pengukuran nilai medan listrik pada kedua komponen horizontal. Kedua dipole ini secara khas dikonfigurasi saling tegak lurus dimana dipole pertama diarahkan utara-selatan dan dipole kedua diarahkan barat-timur. Paku besi dapat digunakan untuk berperan sebagai elektroda untuk pengukuran frekuensi tinggi. Namun, untuk pengukuran frekuensi rendah diperlukan elektroda yang tak terpolarisasi untuk menghindari terjadinya efek elektrokimia. Elektroda yang tak terpolarisasi biasanya terdiri poros pot yang mengandung metal seperti perak (Ag) yang memiliki kontak terhadap senyawa garamnya seperti perak klorida (AgCl). Petiau dan Dupis pada tahun 1980 memberikan gambaran dan komparasi dari kedua jenis elektroda ini (Simpson and Bahr, 2005).

Ada beberapa faktor yang dapat menentukan titik akuisisi data MT yang baik, baik dalam artian dapat menghasilkan kualitas data yang baik. Beberapa faktor tersebut diantaranya:

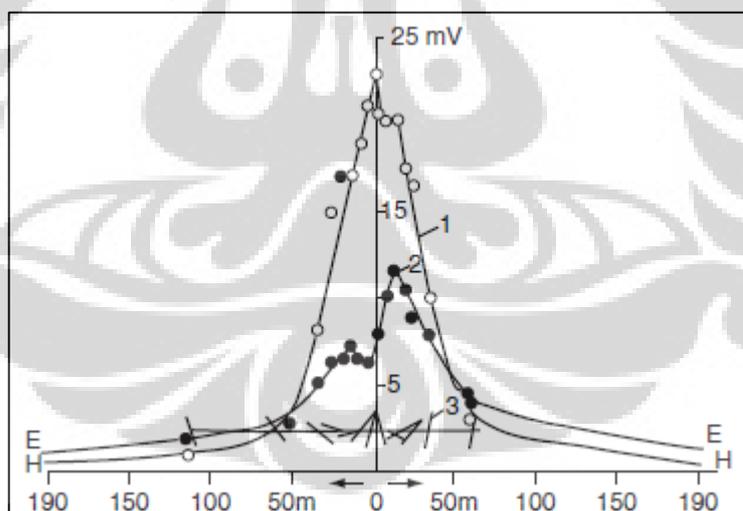
- Jarak yang dekat antara titik tersebut terhadap suatu profil lintasan. Karena dalam beberapa prosedur penyolahan data proses inversi dan pemodelan akan menggunakan suatu lintasan tertentu sebagai acuan *cross section*. Oleh karena itu jarak letak titik harus membentuk suatu lintasan linear dengan beberapa titik lainnya.
- Instalasi instrumen dan kondisi fisik titik pengukuran yang sesuai dimana instrumen yang digunakan harus dalam kondisi yang baik dan titik

pengukuran berada pada suatu area yang relatif datar agar ketinggian tiap sensor relatif sama.

- Jarak yang cukup jauh dari sumber *noise* elektromagnetik.
- Jarak dari sumber struktur geologi dan target.
- Jarak yang cukup jauh dari aktivitas penduduk.
- Keamanan dari interferensi manusia atau hewan sekitar.

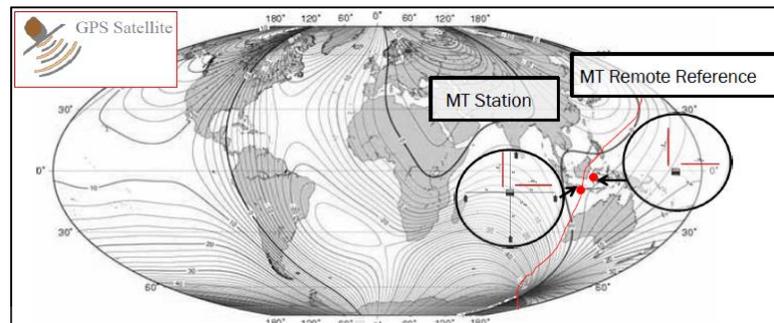
2.3.2 Teknik Preventif untuk Menghindari *Noise* pada Akuisisi Data

Dalam akuisisi data di lapangan, pengaruh *noise* dapat diminimalisir melalui proses pencegahan. Pencegahan data MT agar tidak terkontaminasi *noise* umumnya dilakukan dengan menjauhkan titik pengukuran dengan sumber *noise* yang dimaksud, misalkan dengan titik pengukuran yang diletakan sejauh minimal 200 meter dari aliran *powerline* dan berjarak minimal 100 km dari jalur lalu lintas kereta listrik. Selain itu, titik pengukuran juga harus diberikan jarak tertentu dari suatu struktur patahan atau sesar untuk menghindari *noise* geologi. Penggunaan *remote reference* dapat membantu juga untuk menghindari pengaruh *noise* pada data MT.



Gambar 2. 12. Pengaruh Aliran *Powerline* terhadap Data MT pada Jarak Tertentu dari Sumbernya (Manoj, 2003)

Pada gambar diatas, garis 1 menunjukkan pengaruh total medan magnetik, garis 2 menunjukkan pengaruh pada medan listrik, dan garis 3 menunjukkan arah medan listrik akibat arus listrik.



Gambar 2. 13. Konsep *Remote Reference* (Daud, 2014b)

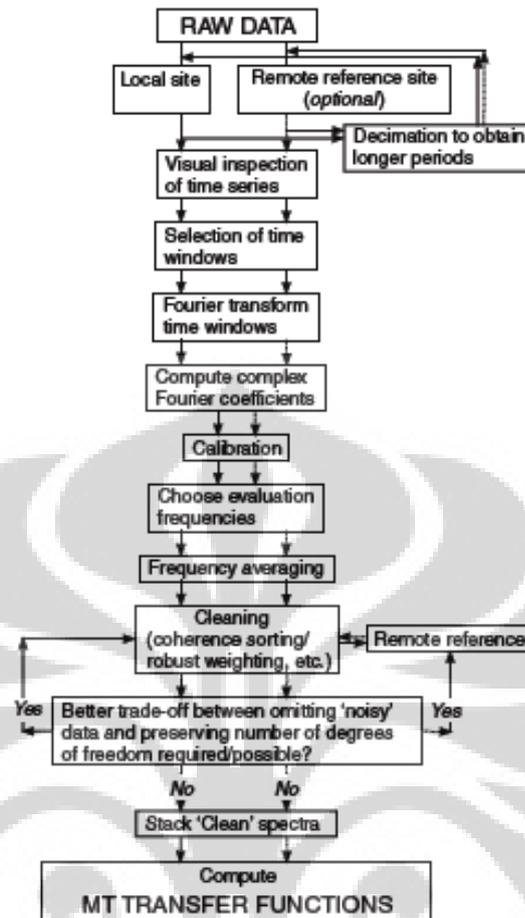
Selain dengan memberikan jarak yang relatif jauh dari sumber *noise*, teknik preventif yang dapat dilakukan adalah menggunakan *remote reference*.

2.4 Pengolahan Data Magnetotellurik

Pemrosesan data magnetotellurik melibatkan konsep gelombang elektromagnetik, analisa *time series* dan teori sistem linear impedansi yang diinterpretasikan dengan skema pemodelan numerik. Reduksi pada pengolahan data MT dilakukan untuk mengeliminasi *noise* yang ikut terukur pada saat akuisisi data.

Dalam metode MT bumi dipandang sebagai sistem yang linear yang merespon suatu proses input (perubahan medan magnet terhadap waktu) yang menghasilkan output yang dapat diprediksi (perubahan medan listrik terhadap waktu). Fungsi transfer impedansi merupakan rasio dari proses ini. Estimasi fungsi transfer dapat terganggu oleh keberadaan *noise* dalam proses input maupun output. Berikut ini merupakan tahapan pengolahan data MT yang dikemukakan oleh Simpson dan Bahr.

Data awal yang didapatkan dari hasil akuisisi data di lapangan berupa cuplikan sinyal medan magnetik pada sumbu x, y, dan z, serta medan listrik pada sumbu x dan y untuk setiap sounding diinspeksi untuk melihat karakteristik sinyal dan *noise* yang terekam. Data *time series* ditransformasikan menjadi spektrum domain frekuensi melalui transformasi fourier. Selain itu, melalui data time series dikalkulasi nilai koefisien fourier. Setelah itu dimasukkan data parameter kalibrasi untuk menghindari kesalahan pencuplikan data yang disebabkan keterbatasan alat dalam pengukuran.



Gambar 2. 14. Tahapan Pengolahan Data MT (Simpson and Bahr, 2005)

Setelah data dikombinasi dengan data kalibrasi, tahap selanjutnya adalah penentuan matrix spectra dan perata-rataan frekuensi. Pada tahap ini juga data dapat diolah menjadi data koherensi untuk analisis kualitas data. Jika nilai koherensi masih bernilai rendah, maka data perlu di-*stacking* untuk meningkatkan nilai rasio *signal to noise* setelah itu barulah data dibentuk dalam fungsi transfer untuk diaplikasikan dalam berbagai data interpretatif seperti kurva resistivitas semu dan fase, tipper, vektor induksi dan lain sebagainya.

Secara lebih detail tahapan pengolahan data MT dijabarkan melalui deskripsi sebagai berikut.

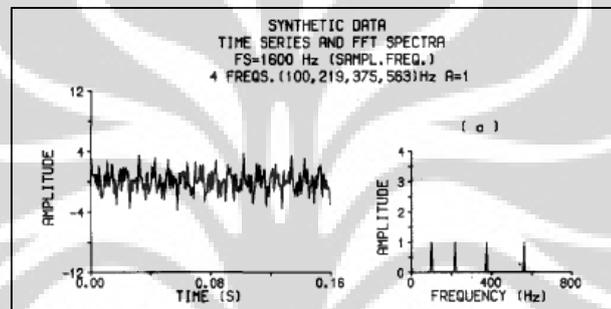
a. *Time Series*

Tahap pertama yang dilakukan pada pengolahan data MT adalah proses inspeksi data mentah (*raw data*) yang diperoleh dari instrumen. *Raw data* MT merupakan data digital dari cuplikan sinyal *time series* dari medan listrik dan

magnetik natural yang ada pada area pengukuran. Pada tahap ini dilakukan proses inspeksi terhadap kualitas *raw data* dimana data *time series* yang terkontaminasi dapat difilter atau diseleksi sehingga tidak masuk kedalam proses pengolahan selanjutnya.

b. Transformasi Fourier

Transformasi Fourier merupakan suatu operasi matematis yang dapat mengkonversi sinyal menjadi spektrum. Dalam metode MT, transformasi Fourier umumnya digunakan untuk mengubah data medan listrik dan magnetik *time series* menjadi bentuk spektrum frekuensinya (Simpson and Bahr, 2005).



Gambar 2. 15. Transformasi Fourier (Fontes et al., 1988)

Transformasi Fourier memanfaatkan sifat periodik pada ortogonalitas dari fungsi trigonometrik. Dengan menyatakan bahwa T adalah periode dan $\phi(t) = 2\pi t/T$ adalah sudut fase. Teori ortogonalitas mendeskripsikan bahwa:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^T \cos(m\phi) \cos(m'\phi) dt &= \begin{cases} T \\ T/2 \\ 0 \end{cases} \\ \int_0^T \sin(m\phi) \cos(m'\phi) dt &= 0 \\ \int_0^T \sin(m\phi) \sin(m'\phi) dt &= \begin{cases} T \\ T/2 \\ 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

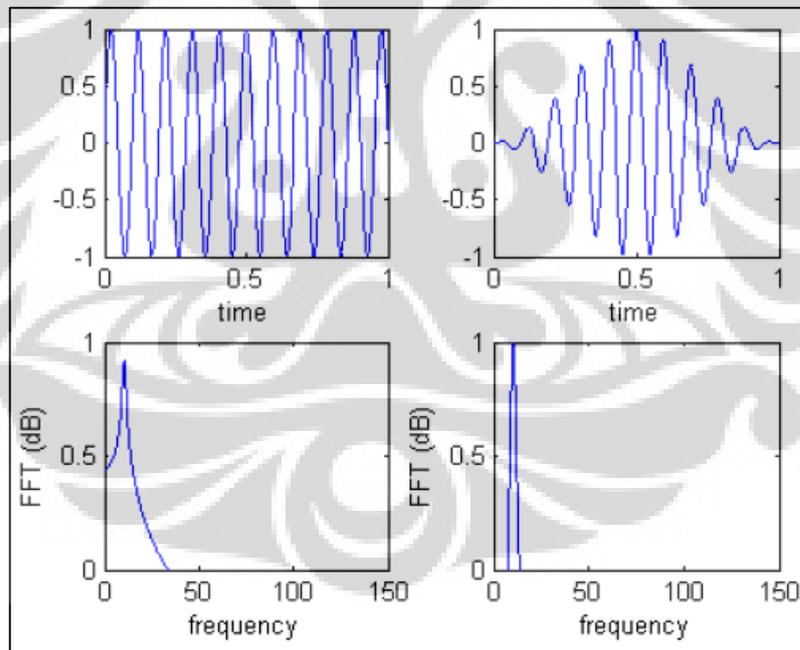
Jika fungsi *time series* $x(t)$ merupakan superposisi dari beberapa fungsi trigonometrik dengan periode yang berbeda, maka:

$$x(t) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos(m\phi) + b_m \sin(m\phi) \quad (2.35)$$

Dimana a_m dan b_m adalah koefisien fourier yang dapat diperoleh melalui:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{T} \int_0^T \cos(m\phi) &= a_m \\ \frac{2}{T} \int_0^T \sin(m\phi) &= b_m \\ \frac{1}{T} \int_0^T x(t) &= a_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Resolusi dan akurasi data frekuensi yang diperoleh dari transformasi fourier sangat dipengaruhi oleh durasi pengukuran. Biasanya untuk berbagai tujuan tertentu seperti menseleksi data *time series*, data perlu diproses terlebih dahulu menggunakan *window tapering*. Terdapat beberapa pilihan jenis *window* yang umumnya digunakan sebelum dilakukan transformasi fourier, diantaranya *rectangular*, *hanning*, *nuttal*, dan lain sebagainya. Umumnya *window* yang digunakan adalah jenis *hanning* karena dapat mentransformasi data random, menghasilkan resolusi yang baik dan dapat mencegah *spectral leakage*.



Gambar 2. 16. Komparasi Antara Data Tanpa *Window Tapering* (kiri) dan menggunakan *Window Tapering* (kanan) (LDS Group - SPX Company, 2003)

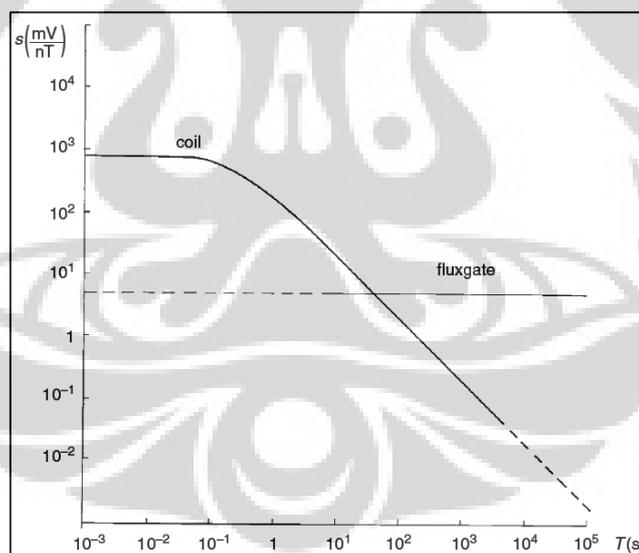
c. Kalibrasi

Dalam melakukan akuisisi MT di lapangan, beberapa instrumen yang digunakan harus dikalibrasi dahulu sebelum dilakukannya survey. Pada proses kalibrasi, kita mengukur respon alat terhadap titik acuan nilai nol dari sinyal yang dicuplik. Sinyal tersebut terdiri atas komponen-komponen harmonis yang berbeda-beda untuk setiap pita frekuensi yang dapat dijangkau alat. Kalibrasi ini menjadi penting karena data kalibrasi dapat menunjukkan apakah alat bekerja dengan baik atau tidak. Selain itu, kalibrasi juga dapat membantu kita dalam menguji apakah pengaturan filter alat yang kita pilih merupakan menggunakan pengaturan yang cocok untuk kondisi lapangan survey. Proses perhitungan kalibrasi terdiri dari 4 tahap, yaitu :

- Kalibrasi sensor yang tidak bergantung terhadap frekuensi.

Kalibrasi ini mempertimbangkan tingkat ketelitian sensor dalam pengukuran data. Misalnya, fluxgate magnetometer mempunyai sensitivitas 5mV/nT.

- Kalibrasi sensor yang bergantung terhadap frekuensi.



Gambar 2. 17. Tingkat sensitivitas sensor terhadap frekuensi (Simpson and Bahr, 2005)

Untuk beberapa sensor, seperti koil induksi mempunyai sensitivitas yang bergantung pada frekuensi sehingga perlu dikalibrasi untuk mengetahui tingkat kesensitivitasnya tersebut.

- Kalibrasi ADC (Analog to Digital)

Kalibrasi ini dilakukan untuk mengetahui resolusi instrumen ketika mencuplik data analog menjadi data digital (*analog to digital converter*).

- Aplikasi koefisien kalibrasi pada output transformasi fourier

Pada dasarnya kalibrasi pada point 1 dan 3 dapat dilakukan pada tahap apa saja. Namun, faktor kalibrasi yang bergantung pada frekuensi seperti *steep anti-alias filter* dideskripsikan dari data dengan sebuah fungsi (f_m) dan hasil konvolusi ini harus dilakukan pada *raw spectrum* sebelum resolusi frekuensi dikurangi pada tahap ketiga.

d. Matrix Spektra

Matrix spektra menentukan deret frekuensi yang akan dikorelasikan dan ditransfer menjadi fungsi yang lebih lanjut seperti resistivitas dan fase. Susunan deret yang umumnya digunakan terdiri dari 2 macam yaitu; deret logaritma dan dispersi Weidelt. Domain frekuensi dibentuk dalam matriks logaritmik. Sebagai contoh:

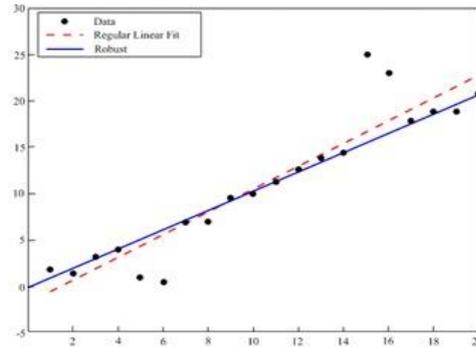
Matrik Spektra Ideal : 10^{-n+4} : 1000, 100, 10, 1, 0.1, 0.01, 0.001 Hz

Phonenix : $10^{-0,0756n + 3,0927}$: 1040, 873.7603 734.0934, 616.7516, ... Hz

Metronix : $10^{-0,1242n + 5,2733}$: 100000, 76746.3 58899.95 45203.54, ... Hz

e. Least Square dan Estimasi Robust

Teknis pemrosesan data dengan menggunakan metode least square melibatkan proses isolasi komponen Z menggunakan estimasi least square cross power spectral density, dengan asumsi $\delta Z(\omega)$ diasumsikan terdistribusi normal Gaussian. Dasar utama dari pemrosesan data dengan menggunakan estimasi least square adalah data bersifat power independent, tidak terkorelasi dan terdistribusi secara normal gaussian. Dengan demikian estimasi ini sangat rentan dengan pengaruh outlier.



Gambar 2. 18. Komparasi Antara Estimasi Robust dengan *Least Square* (Tan, 2008)

Estimasi Robust melibatkan algoritma yang mempertimbangkan bobot data secara berulang untuk dalam memperhitungkan *error* pada distribusi Data Normal Gaussian.

f. Fungsi Transfer

Bumi dipandang sebagai suatu sistem linear dimana bumi akan merespon suatu input proses (misalnya variasi waktu terhadap medan magnet) dengan sebuah prediksi proses output (misalnya variasi waktu terhadap medan listrik). Fungsi transfer merupakan rasio dari kedua proses ini. Ekspansi Linear dari Fungsi Transfer yang terkontaminasi *noise* dapat diformulasikan melalui persamaan berikut:

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

Nilai resistivitas semu dan fase dapat diperoleh dari nilai impedansi melalui persamaan.

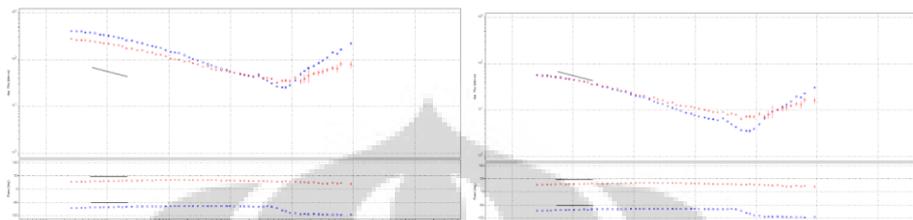
$$\rho_{axy} = \frac{\mu_0}{\omega} |Z_{xy}|^2 = \frac{\mu_0}{\omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.38)$$

$$\varphi_{xy} = \arctan(Z_{xy}) = \arctan\left(\frac{\Im(Z_{xy})}{\Re(Z_{xy})}\right) \quad (2.39)$$

g. Koreksi Pergeseran Statik

Pada data yang medan listrik dan medan magnetik diperoleh melalui metode MT sering dijumpai adanya pergeseran statik yang disebabkan oleh heterogenitas

batuan di dekat permukaan, efek topografi dan kontak vertikal. Pergeseran ini terjadi pada arah vertikal pada kurva resistivitas semu TE dan TM dalam domain frekuensi. Jika tidak dilakukan koreksi maka data akan memunculkan ambiguitas dan kesalahan interpretasi.



Gambar 2. 19. Kurva MT Sebelum (kiri) dan Sesudah (kanan) dikoreksi statik (Sulistyo, 2011)

Pergeseran statik ini umumnya dapat dikoreksi dengan menggunakan data *Time Domain Electromagnetic* (TDEM). Namun, jika data TDEM belum tersedia dikarenakan pengukuran TDEM memerlukan peralatan yang mahal dan dapat menghabiskan waktu serta biaya operasional yang lebih besar maka dapat digunakan metode geostatistik *complex kriging* (*cokriging*) dan perata-rataan (*averaging*) menggunakan *geomagnetic transfer function* (Sulistyo, 2011).

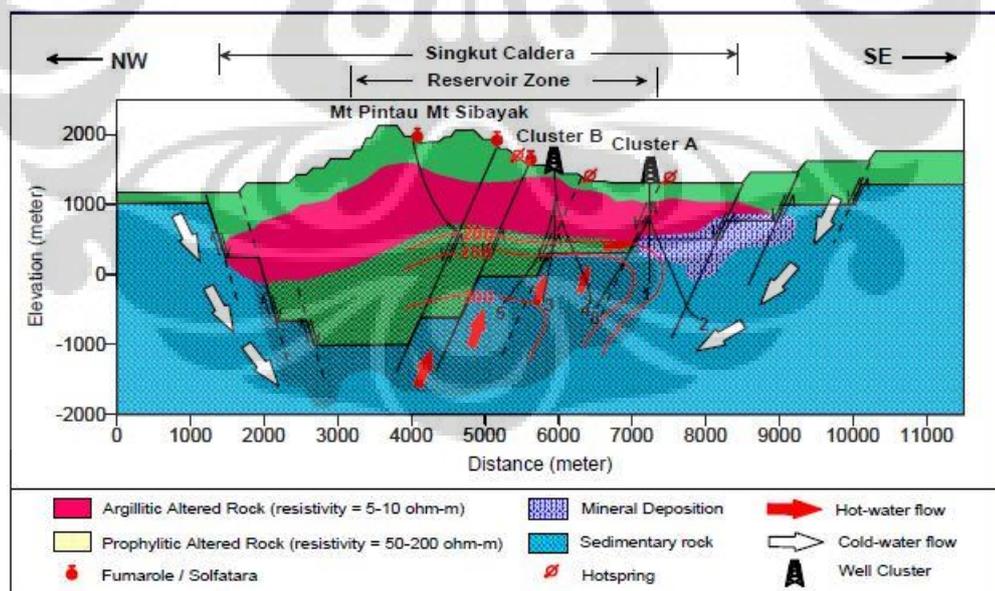
2.5 Penggunaan Magnetotellurik dalam Ekplorasi Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi merupakan suatu proses yang mendeskripsikan aliran panas dari *heat source* menuju *heat sink*. Sistem panas bumi umumnya terdiri dari beberapa komponen, diantaranya *cap rocks*, *reservoir*, *heat source*, dan fluida di dalam reservoir.

Cap rocks umumnya merupakan lapisan *clay* yang bersifat *low permeable* yang berada di atas reservoir. Lapisan ini berfungsi sebagai menutup aliran fluida dan kalor pada zona reservoir yang mengalir akibat proses konveksi. Namun, tetap saja lapisan ini tidak dapat mencegah aliran panas ke permukaan bumi yang terjadi secara konduksi. Akan tetapi, jumlah panas yang terlepas secara konduksi ini sangat kecil dibandingkan dengan aliran panas yang lepas melalui proses konveksi. Lapisan *cap rock* yang merupakan batuan ubahan dari hasil proses alterasi hidrotermal yang terjadi pada suatu sistem panas bumi dinamakan *clay cap*. Proses

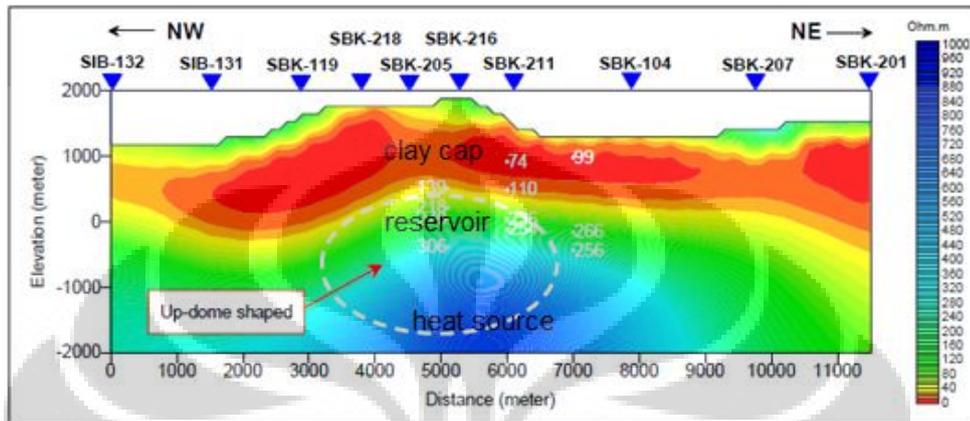
alterasi hidrotermal dapat menghasilkan beberapa jenis *clay cap* tergantung dengan temperatur batuan *clay* pada saat terjadi proses tersebut. Lapisan *clay* jenis *smectite* dan campuran *clay* jenis *smectite-illite* terbentuk pada kisaran temperatur $< 200^{\circ}\text{C}$. Reservoir yang menjadi tempat terakumulasinya energi panas menjadi zona target karena menyimpan fluida dalam bentuk air panas ataupun uap panas bertekanan tinggi. Namun, batuan di reservoir idealnya memiliki porositas dan permeabilitas natural yang besar sehingga dapat menampung banyak fluida dan aliran fluida di dalamnya dapat berjalan baik. Beberapa literatur menyebutkan bahwa 90% dari fluida yang mengisi reservoir berasal dari air hujan (fluida meteorik) yang meresap ke dalam tanah. Fluida lainnya bisa berasal dari cairan magmatik (*magmatic fluid*) yang banyak mengandung H_2S , HCl , SO_2 , Fe, dan Mg. *Magmatic fluid* ini juga turut mempengaruhi proses alterasi pada batuan selain panas yang dihasilkan dari *heat source*.

Heat source merupakan sumber panas pada sistem yang berupa *hot rock* yang biasanya berasal dari intrusi magma. Intrusi magma ini dapat menyusup mendekati ke permukaan melalui rekahan-rekahan yang muncul pada batuan dasar kristalin (*basement*).



Gambar 2. 20. Sistem Panas Bumi (Daud, 2014a)

Respon MT pada sistem panas bumi umumnya menunjukkan suatu distribusi lapisan dengan resistivitas 1 s.d. 15 ohm.m sebagai *clay cap*, lapisan dengan resistivitas 30 s.d. 50 ohm.m yang berada dibawah *clay cap* sebagai reservoir, dan lapisan diatas 80 ohm.m sebagai *heat source*.



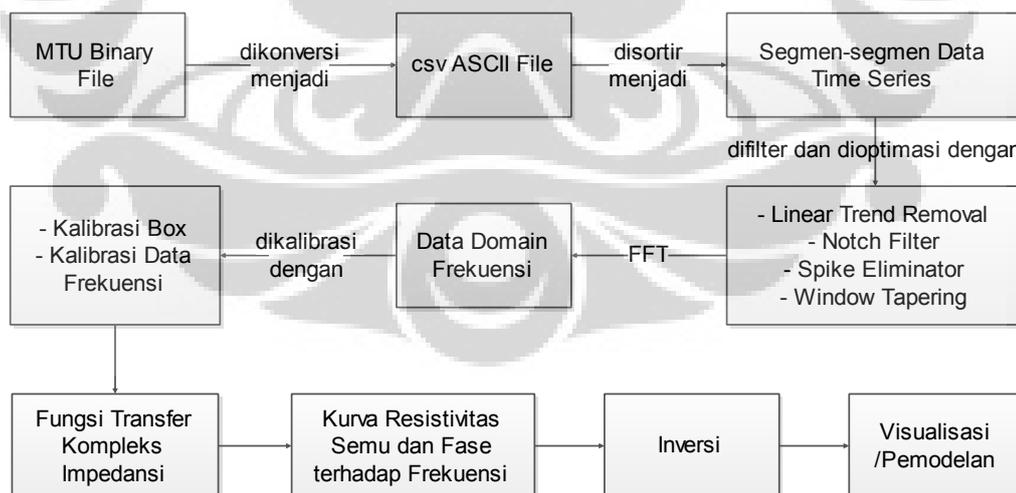
Gambar 2. 21. Respon MT pada sistem Panas Bumi (Daud, 2015)

Untuk menguatkan indikasi adanya sistem panas bumi dibawah permukaan bumi, umumnya respon MT akan membentuk suatu *up-dome shaped* yang muncul akibat aliran dan gradien panas dari *heat source* yang merambat secara radial.

BAB 3 PEMBUATAN PROGRAM DAN PENGOLAHAN DATA

3.1 Pembuatan Program dengan Menggunakan MATLAB

Pada awal pembuatannya program ini dibangun dengan fungsi untuk mengolah data mentah *time series* yang disimpan dalam bentuk format data MTU hingga diperoleh nilai resistivitas semu dan fase pada domain frekuensi. Format data MTU ini merupakan data mentah hasil akuisisi medan listrik pada komponen x dan y serta medan magnetik pada komponen x,y, dan z, dimana data medan listrik dan magnetik diperoleh dari instrumen Phoenix Geophysics. Pada pengembangan selanjutnya program ini dikembangkan dengan melibatkan faktor kalibrasi box dan kalibrasi yang bergantung frekuensi. Selanjutnya, program dikembangkan dengan melibatkan berbagai macam fitur tambahan seperti koherensi dan autokorelasi serta filter-filter sinyal digital seperti *notch filter*, *median filter*, dan seleksi data *time series*. Selain memiliki fitur filterisasi, program yang kini dikembangkan dengan nama MTFilter juga memiliki fitur fungsi analisis seperti, inspeksi *time series*, koherensi, dan autokorelasi. Mekanisme kerja program MTFilter diuraikan melalui gambar berikut.

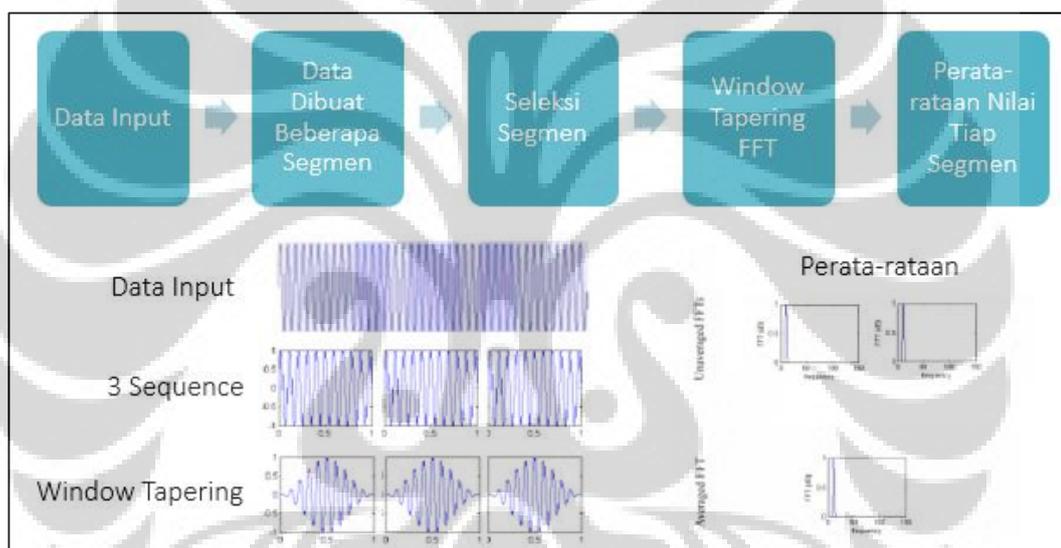


Gambar 3. 1. Mekanisme Kerja Program

Konversi data MTU menjadi data ASCII dilakukan dengan menggunakan proses pembacaan sandi (*decode*) data biner kemudian data tersebut dikonversi dan

ditulis ulang (*encode*) dalam bentuk data ASCII Hexadesimal dengan format file *.csv. Proses konversi ini dilakukan untuk memudahkan dalam proses analisis dan pemrosesan data selanjutnya.

Proses selanjutnya adalah filterisasi *linear trend removal* dimana proses ini bertujuan untuk menghilangkan trend linear pada data time series yang seharusnya merupakan fungsi trigonometri. Efek dari linear trend ini jika tidak difilterisasi adalah dapat memunculkan penyimpangan (*leakage*) pada data domain frekuensi yang diperoleh setelah dilakukannya transformasi fourier. Proses yang dilakukan pada linear trend ini adalah dengan merubah nilai gradien dari rata-rata data time series menjadi nol.



Gambar 2. 22. Proses Pembuatan Segmen dan Seleksi Data *Time Series*

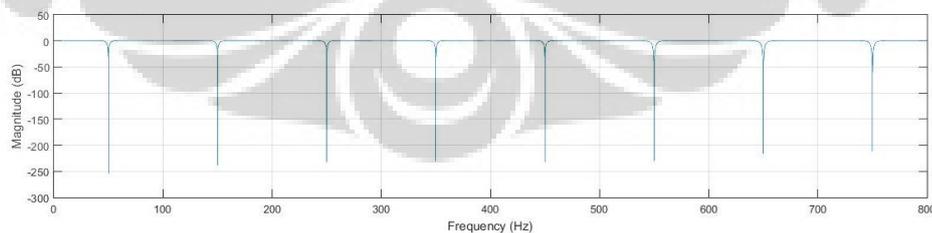
Kemudian, proses pengolahan berlanjut dengan pembuatan segmen data dimana data yang diukur dalam rentang waktu pengukuran dibagi menjadi segmen-segmen data dengan durasi 2 detik. Hal ini dilakukan untuk memudahkan proses pengeliminasian *noise* terutama proses seleksi data *time series*. Kekurangan dari proses segmentasi ini adalah dapat menurunkan resolusi dan akurasi data domain frekuensi ketika data *time series* ditransformasi fourier. Untuk mengatasi hal ini, data akan dikonvolusikan dengan suatu fungsi *window tapering* sebelum ditransformasi fourier. Fungsi *window* yang digunakan pada program MTFilter adalah hanning, karena fungsi ini dipercaya memiliki kelebihan dalam hal

meningkatkan resolusi dan akurasi data hasil transformasi fourier dibandingkan fungsi window lainnya seperti *rectangular* dan *nuttal*.

Tabel 3. 1. Komparasi Jenis-Jenis *Window* pada proses *Tapering* (*LDS Group - SPX Company, 2003*)

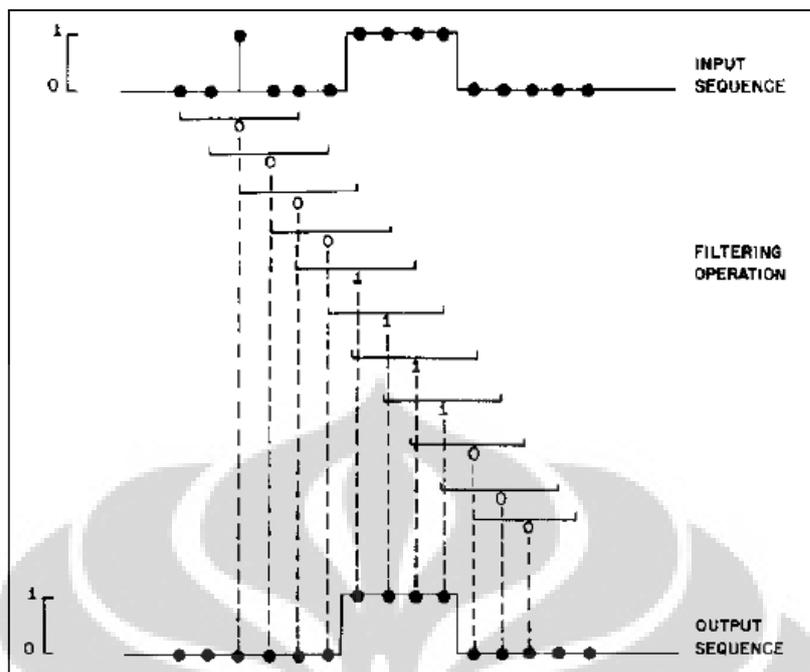
Window	Best for these Signal Types	Frequency Resolution	Spectral Leakage	Amplitude Accuracy
Bartlett	Random	Good	Fair	Fair
Blackman	Random or mixed	Poor	Best	Good
Hanning	Random	Good	Good	Fair
Hamming	Random	Good	Fair	Fair
Kaiser-Bessel	Random	Fair	Good	Good
None (boxcar)	Transient & Synchronous Sampling	Best	Poor	Poor
Tukey	Random	Good	Poor	Poor
Welch	Random	Good	Good	Fair

Setelah dilakukan proses *window tapering* Program MTFilter akan memulai proses filterisasi pada *harmonic powerline noise* dengan menggunakan *notch filter*. Notch filter yang digunakan pada program ini dibentuk menggunakan butterworth filter dengan faktor kualitas sebesar 0.01. Respon filter terhadap data dibuat sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk mengeliminasi data berfrekuensi 50 Hz dan kelipatan bilangan bulatnya. Namun, karena data lapangan hanya mengandung anomali amplitudo frekuensi pada kelipatan ganjilnya saja maka secara visual respon filter digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3. 2. Respon *Notch Filter* pada Program MTFilter

Langkah selanjutnya proses filterisasi dengan menggunakan *spike eliminator* dengan menggunakan median filter. Prinsip kerja *spike eliminator* ini diuraikan dengan menggunakan diagram sebagai berikut.



Gambar 3. 3. Skema Proses Pengolahan *Median Filter* sebagai *Spike Eliminator*

Sebagaimana yang telah kita tahu bahwa untuk mengubah data MT dari domain waktu ke dalam domain frekuensi digunakan transformasi Fourier, terutama teknik Fast Fourier Transform (FFT) agar proses transformasi yang dilakukan lebih cepat dan efisien. Algoritma dan proses transformasi telah dijelaskan sebelumnya pada bagian landasan teori.

Proses kalibrasi yang dilakukan pada program ini dilakukan dengan menggunakan dua parameter, yakni kalibrasi box atau *mainboard* dan kalibrasi koil. Kalibrasi koil digunakan sebagai faktor pengali dari nilai hasil bacaan masing-masing koil pada mencuplik data pada suatu frekuensi tertentu. Data kalibrasi koil pada setiap komponen memiliki nilai yang berbeda-beda. Dalam instrumen Phoenix data kalibrasi bisa diunduh dalam bentuk format data *.CLC. Data kalibrasi box sebetulnya memiliki deskripsi yang relatif sama dengan kalibrasi koil tapi data kalibrasi box berlaku sama pada setiap komponen, artinya faktor pengalinya sama disetiap komponen. Data kalibrasi box pada instrumen Phoenix dapat diunduh dalam bentuk file *.CLB. Sebenarnya dalam file *.CLC dan *.CLB terdapat data kalibrasi fase, tetapi pada saat ini belum dapat diimplementasikan kedalam program.

Hasil pengolahan data ini kemudian diproses menjadi fungsi transfer impedansi dengan menggunakan persamaan 2.15. Data resistivitas semu dan frekuensi ditampilkan dengan menggunakan persamaan 2.39 dan 2.40. Rotasi tensor impedansi pada program MFilter dapat dilakukan dengan menggunakan input sudut tetap (*fix angle*) atau dengan maksimasi nilai $|Z_{xy}$ dan Z_{yx}^2 menggunakan

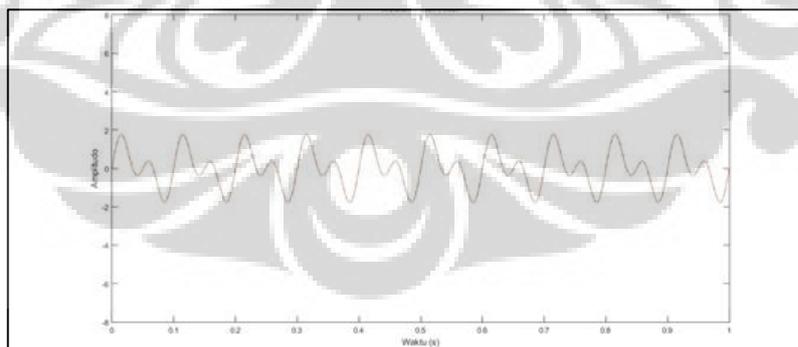
$$\text{persamaan } \theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left(\frac{2R_1 R_2 + I_1 I_2}{(R_1^2 + I_1^2) - (R_2^2 + I_2^2)} \right) \quad \text{dimana } R_1 = R_e(Z_{xx} - Z_{yy}),$$

$I_1 = I_m(Z_{xx} - Z_{yy}), R_2 = R_e(Z_{xy} - Z_{yx}), \text{ dan } I_2 = I_m(Z_{xy} - Z_{yx})$. Dimana θ adalah sudut rotasi, I adalah nilai bilangan imajiner, dan R adalah nilai bilangan real, serta Z adalah impedansi.

Proses pengujian program dilakukan dengan menggunakan data sintetik dan data lapangan. Pengujian pada data sintetik hanya dilakukan pada program MFilter dan tidak dikomparasi dengan software komersil SSMT 2000 dikarenakan keterbatasan dalam pembuatan data sintetik yang disimpan dalam format MTU yang dapat diproses menggunakan SSMT 2000.

a. Pembuatan Sinyal Sintetik

Sinyal sintetik yang digunakan dibuat dengan menggunakan persamaan gelombang sinusoidal sederhana $y = \sin(2\pi ft)$ dimana f adalah frekuensi dan t adalah waktu.

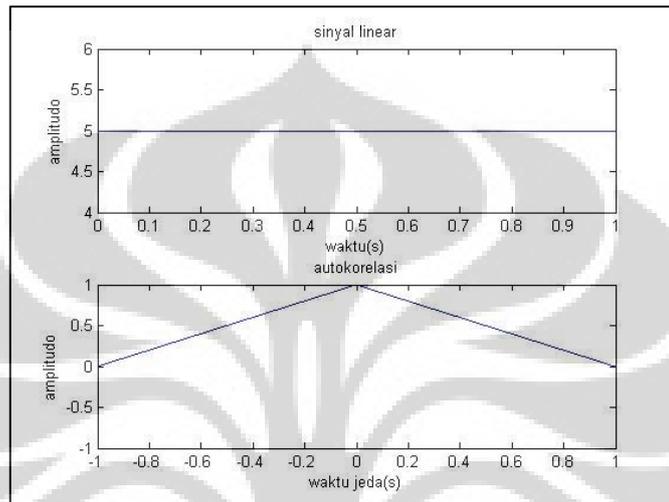


Gambar 3. 4. Salah Satu Model Sinyal Sintetik.

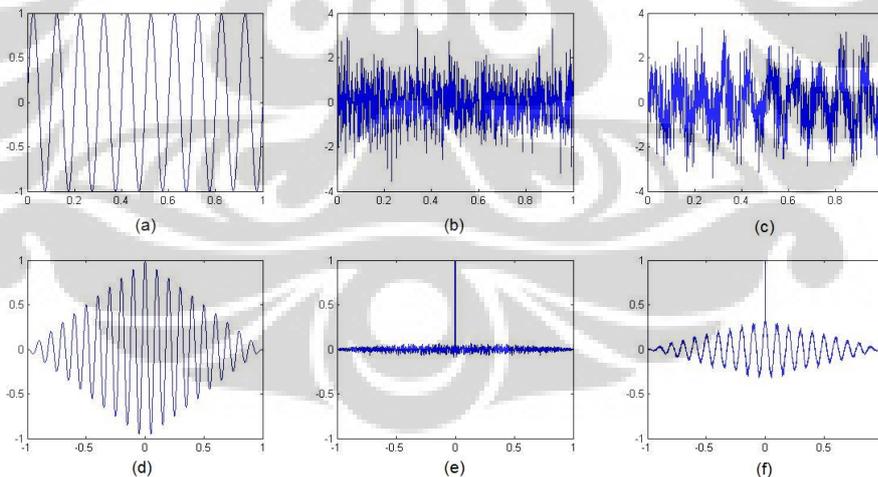
Noise sintetik yang dibuat baik secara periodik ataupun tidak dibuat menyesuaikan dengan persamaan gelombang sinusoidal diatas.

b. Autokorelasi

Autokorelasi merupakan fitur tambahan yang berfungsi untuk memberikan gambaran sifat periodik dari suatu sinyal. Sinyal yang terkontaminasi *noise* dapat menjadi kurang periodik karena amplitudo gelombang sinusoidal yang merupakan fungsi waktu dan bervariasi secara periodik dapat berubah akibat pengaruh *noise*.



Gambar 3. 5. Autokorelasi dari Sinyal Non Periodik (Garis Lurus)



Gambar 3. 6. Autokorelasi dari Sinyal Sintetik. (a) Sinyal Sintetik (d) 100% *Noise* (c) Sinyal Sintetik yang Terkontaminasi *Noise* (d) Autokorelasi Sinyal Sintetik (e) Autokorelasi 100% *Noise* (d) Autokorelasi Sintetik yang Terkontaminasi *Noise*

Autokorelasi prinsipnya menghitung nilai normalisasi dari hasil kali suatu sinyal dengan dirinya sendiri dalam variasi selisih waktu inisial. Prinsip ini jika

dilakukan pada dua sinyal yang berbeda dengan nilai selisih waktu inisial yang bernilai nol dapat membentuk suatu fungsi korelasi silang. Secara matematik fungsi autokorelasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$r_{xx}(l) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n-l)}{\sqrt{\sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2(n-l)}} \quad (3.1)$$

Dimana r adalah nilai autokorelasi, $x(n)$ adalah nilai amplitudo sinyal pada data ke- n , dan l adalah selisih waktu inisial antara sinyal dengan duplikasinya.

c. Koherensi

Koherensi memiliki fungsi yang relatif sama dengan korelasi silang. Namun, antara koherensi dan korelasi memiliki hasil perhitungan yang berbeda dimana fungsi korelasi akan menghasilkan nilai yang berdomain waktu sedangkan koherensi akan menghasilkan nilai yang berdomain frekuensi. Baik korelasi maupun koherensi akan merepresentasikan hubungan antara dua sinyal dalam sistem linear, sesuai dengan karakteristik dan hubungan antara medan magnetik dan medan listrik yang berhubungan dalam sistem linear impedansi.

Tingkat random *noise* yang terdapat pada data dapat dikuantifikasi dengan memperhatikan besar korelasi linear antara komponen medan magnet dan medan listrik. Bentuk umum koherensi diuraikan pada persamaan berikut:

$$\gamma_{EB} = \frac{\langle E^*B \rangle}{\sqrt{\langle (E^*E)(B^*B) \rangle}} = \frac{[S_{xy}]}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (3.2)$$

Dimana untuk koherensi parsial,

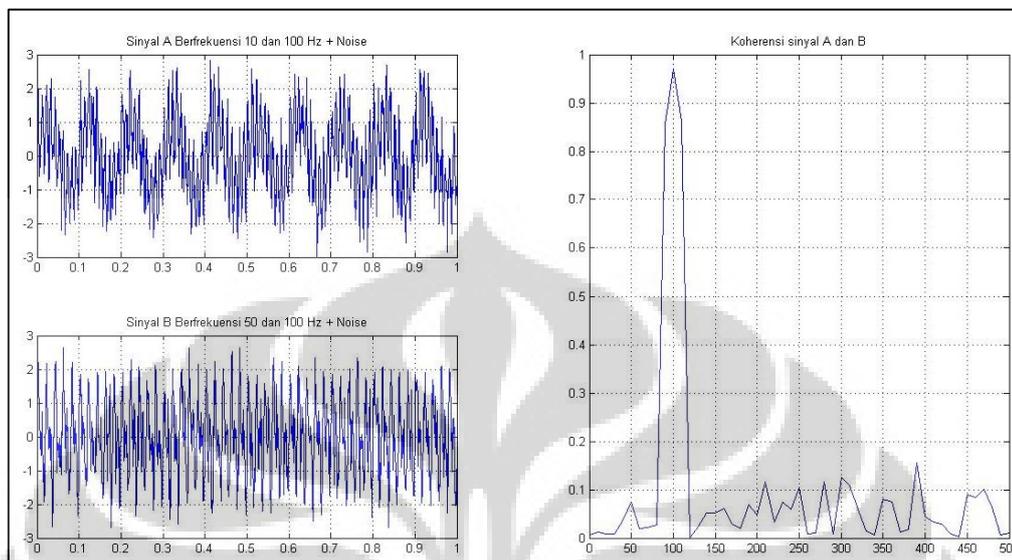
$$\gamma_{E_1B \cdot E_2} = \frac{[S_{x_1y \cdot x_2}]}{\sqrt{(S_{x_1x_1 \cdot x_2} S_{yy \cdot x_2})}} \quad \text{dimana } S_{xy \cdot z} = S_{xy} - S_{zy}S_{xz}/S_{zz} \quad (3.3)$$

Sedangkan koherensi multiple,

$$\gamma_{E \cdot B} = \mathbf{1} - [\mathbf{1} - \gamma_{E_1B}^2] [\mathbf{1} - \gamma_{E_2y \cdot E_1}^2] \quad (3.4)$$

Koherensi yang umumnya digunakan dalam berbagai software komersil yang ada menggunakan persamaan 3.2 sebagai parameter penganalisisnya. Sedangkan, persamaan koherensi parsial dan multiple hanya digunakan untuk kepentingan

pengolahan lanjutan atau jika koherensi umum belum menunjukkan hasil yang diharapkan.

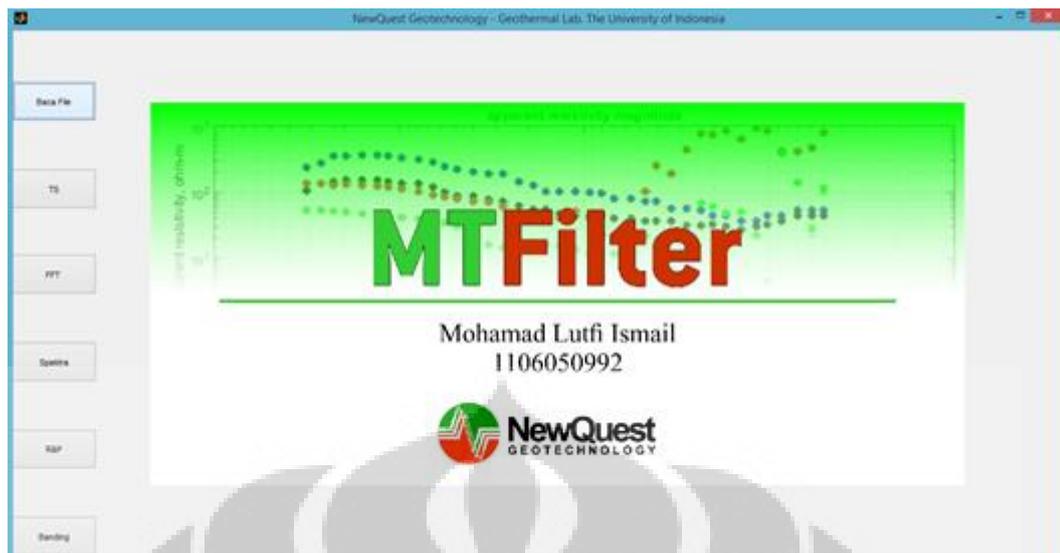


Gambar 3. 7. Koherensi pada Sinyal Sintetik

Pada gambar diatas terlihat bahwa sinyal A yang terkontaminasi *noise* memiliki frekuensi 10 dan 100 Hz, sedangkan sinyal B memiliki frekuensi 50 dan 100 Hz. Kedua sinyal A dan B memiliki frekuensi yang sama, yaitu 100 Hz sehingga ketika dilakukan perhitungan koherensi dengan menggunakan persamaan 3.2 didapatkan bahwa amplitudo kurva koherensi memiliki nilai maksimum pada frekuensi 100 karena kedua sinyal A dan B memiliki frekuensi yang sama, yaitu 100 Hz.

3.2 Graphical User Interface (GUI) Program MTFilter

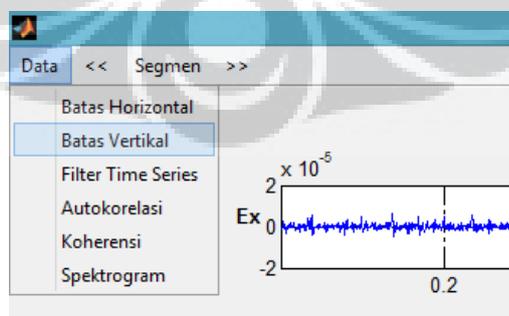
Pada dasarnya program MTFilter dapat berjalan dengan menggunakan *interface* pada MATLAB. Namun, untuk membuat program lebih interaktif maka dilakukan pembuatan GUI pada program MTFilter. Secara umum gambaran GUI pada program MTFilter adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 8. *Home Screen* pada Program MTFilter

Dalam program ini juga terdapat menu utama yang terdiri dari menu “Baca File” untuk membaca dan mengkonversi data biner *time series* dengan format MTU (*ts3, *ts4, *ts5) menjadi format ASCII (*.csv), menu “TS” untuk menampilkan data hasil konversi, menu “FFT” untuk melakukan proses FFT dan pengolahan data lainnya, menu “Spektra” untuk menampilkan hasil spektrum frekuensi hasil FFT, menu “R&P” untuk menampilkan kurva resistivitas semu dan fase, dan menu “Banding” untuk melakukan komparasi kurva resistivitas semu dan fase hasil pengolahan MTFilter dan SSMT 2000.

Menu tambahan berupa autokorelasi, koherensi, dan lain sebagainya ditampilkan pada menu berikut ini.

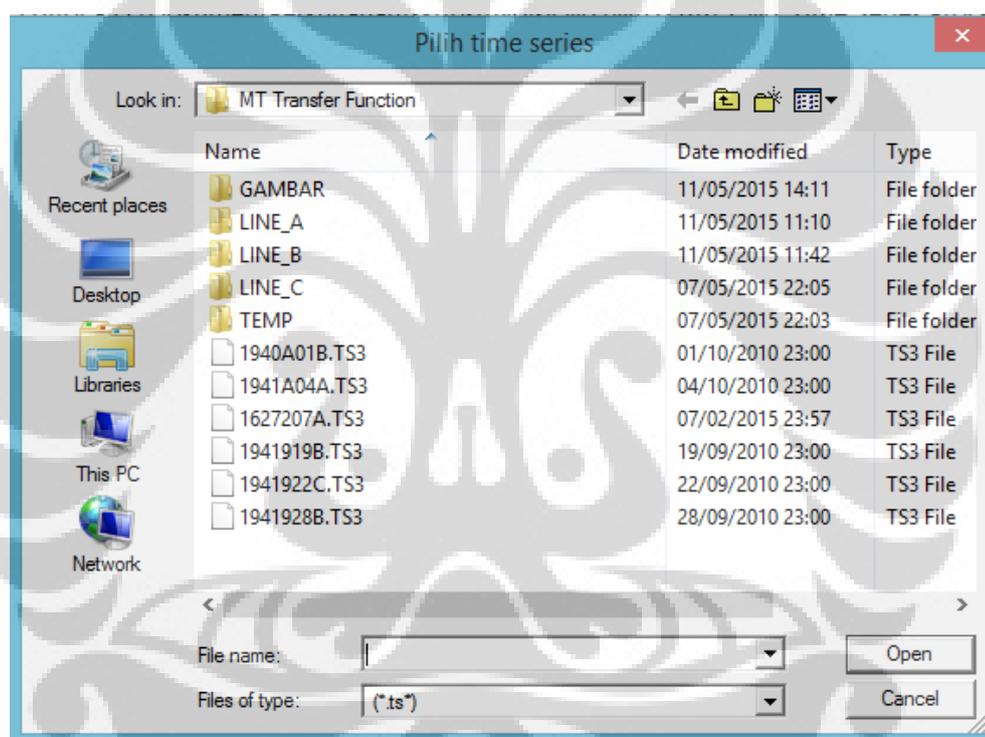


Gambar 3. 9. Fitur Tambahan dan Filter *Time Series* pada Program MTFilter

3.3 Pengolahan Data Menggunakan MTFilter

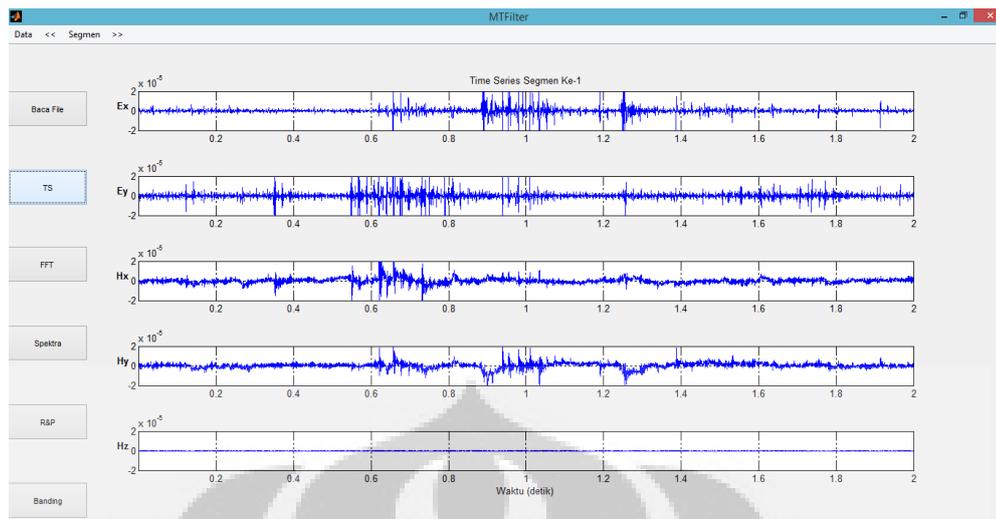
Mekanisme pengolahan data dengan menggunakan MTFilter dilakukan berdasarkan diagram alir yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1. Secara eksplisit, pengolahan data dapat dilakukan dengan menu-menu dalam GUI yang telah dibuat sebelumnya.

Untuk memulai proses pengolahan data pada program MTFilter, hal pertama yang dilakukan adalah proses pembacaan dan konversi data biner dengan menggunakan menu “Baca Fle”. Setelah itu muncul tampilan seperti gambar berikut.



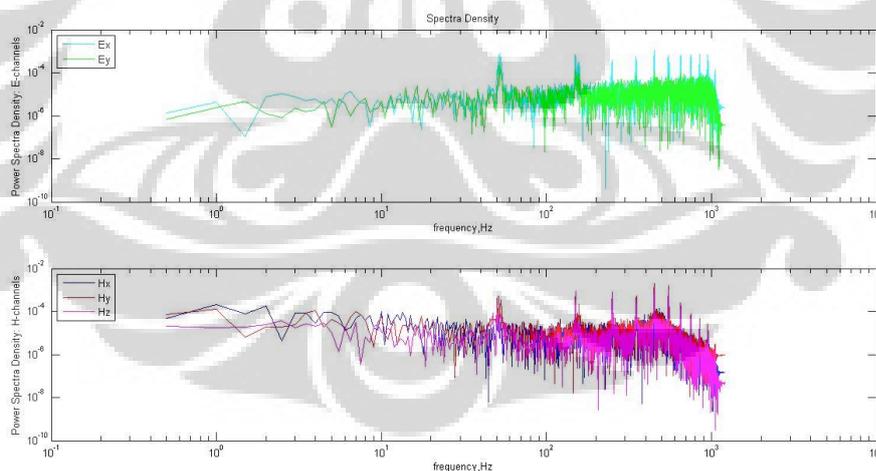
Gambar 3. 10. Input File MTU

Data format MTU dapat dipilih dan setelah itu dilakukan proses konversi. Kemudian, proses selanjutnya adalah inspeksi data time series dengan menggunakan menu “TS” sehingga muncul tampilan sebagai berikut:



Gambar 3. 11. Visualisasi Data Time Series pada MTFilter

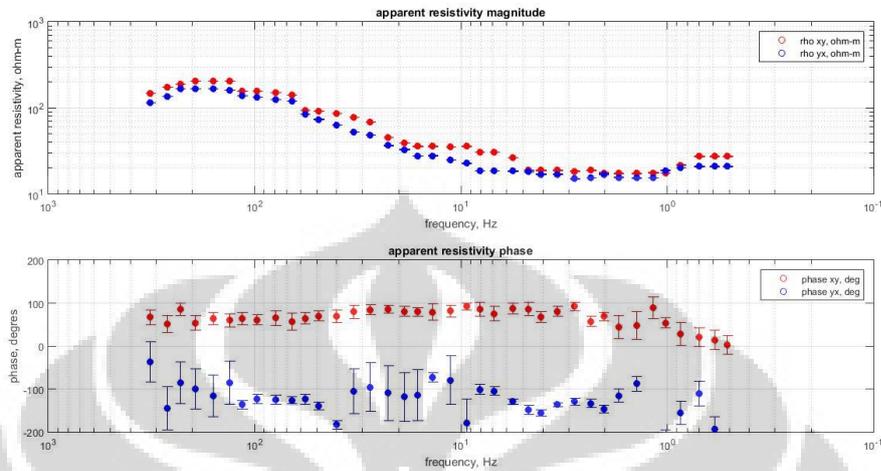
Proses pemilihan segmen dapat dilakukan dengan menggunakan menu segmen yang berada dipojok kiri atas program. Setelah data selesai diinspeksi dan diketahui segmen mana saja yang perlu dieliminasi langkah berikutnya adalah proses filterisasi menggunakan *linear trend removal*, *notch filter*, dan *median filter* dengan memilih menu “Data” kemudian pilih “Filter Time Series”.



Gambar 3. 12. Spektrum Frekuensi

Proses transformasi fourier hingga didapatkan data resistivitas semu dan fase dilakukan dengan mengklik menu “FFT” dan untuk menampilkan hasil pengolahannya dapat dilakukan dengan mengklik menu “Spektra” untuk melihat

spektrum frekuensi dan menu “R&P” untuk melihat hasil kurva resistivitas semu dan fase.



Gambar 3. 13. Kurva Resistivitas Semu dan Fase

Kurva resistivitas dan fase pada domain frekuensi diperoleh berdasarkan proses kalkulasi fungsi impedansi dan rotasi dengan mengasumsikan nilai Z_{xy} dan Z_{yx} bernilai maksimum.

3.4 Pengolahan Data Menggunakan SSMT 2000

Software komparator pada penelitian ini adalah SSMT 2000 yang merupakan software resmi pengolah data MT yang datanya diakuisisi dengan instrumen Phoenix.



Gambar 3. 14. Phoenix System

Phoenix Geophysics merupakan salah satu industri instrumentasi dan kontraktor yang bergerak di bidang geofisika. Phoenix didirikan pada tahun 1975 di Kanada.

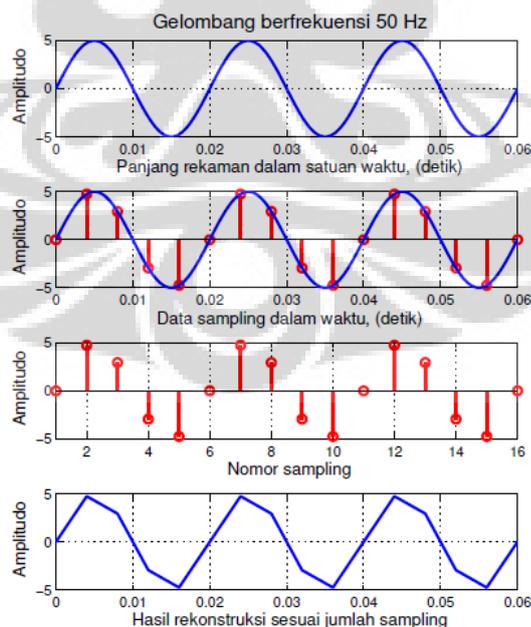
a. Time Series

Pada tahap analisis time series software yang digunakan adalah Synchro Time Series Viewer, fungsi utama software ini adalah untuk melakukan inspeksi data dan analisis koherensi dan spektra. Inspeksi data dapat dilakukan dari time series hingga frekuensi series untuk melihat keberadaan *noise*, *deadband*, dan permasalahan lainnya.

Data yang ditampilkan pada software ini merupakan data yang telah dikonversi dari nilai potensial listrik. Mekanisme instrumen dalam mengukur nilai medan listrik dan magnet natural adalah dengan mengukur nilai potensial natural melalui sensor. Melalui persamaan dibawah ini instrumen dapat memperoleh nilai medan listrik dan medan magnetik.

$$U = E \times d \Leftrightarrow U_{\text{agl}} = -N \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.5)$$

Dimana U adalah potensial listrik natural yang terukur, E adalah medan listrik, d adalah jarak kedua poros pot, N adalah jumlah lilitan pada koil dan t adalah waktu.



Gambar 3. 15. Proses Pencuplikan Data Time Series pada Instrumen *Phoenix*

Raw data time series yang diperoleh dari instrumen *Phoenix* terdiri dari 5 kategori yang dibedakan berdasarkan parameter frekuensi sampling.

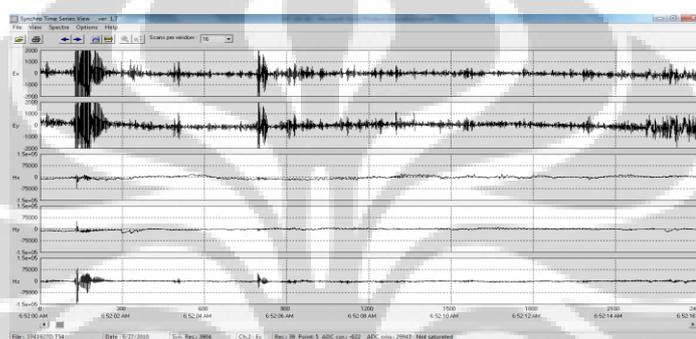
Namun pada metode MT biasanya hanya digunakan tiga atau empat kategori diantaranya:

.TS2 = 24 000Hz sample rate.

.TS3 = 2400Hz sample rate.

.TS4 = 150Hz sample rate.

.TS5 = 15Hz sample rate.



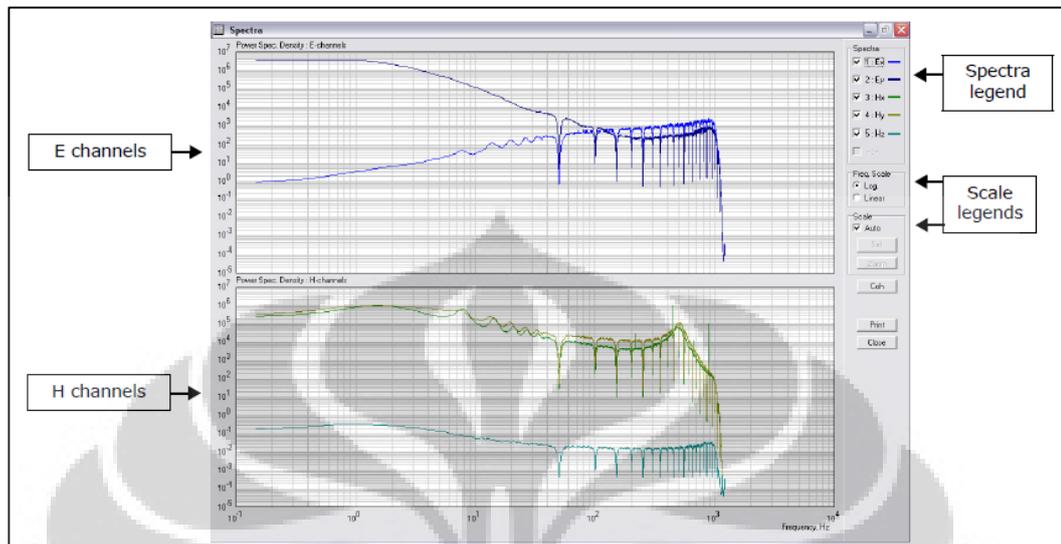
Gambar 3. 16. Visualisasi *Raw Data Time Series* pada Synchro TSV

Cara paling mudah dalam mengkarakterisasi kualitas data time series adalah dengan melihat heterogenitas data dan jumlah *spike* yang muncul. Biasanya, yang akan dilihat sebagai acuan banyaknya *noise* yang terekam adalah .TS5 karena rentang frekuensi ini memiliki weak signal berfrekuensi rendah dan umumnya sangat rentang terkontaminasi *noise*. *Noise* ini ditandai dengan *magnitude* yang sangat besar (>100 nT atau mV/m). Untuk menghilangkan *noise* pada pengolahan lebih lanjut, data yang diolah hanya pada rentang waktu yang tidak memiliki fluktuasi *magnitude* medan magnet dan medan listrik yang mencapai >100 nT atau mV/m. Untuk itu, kita perlu melihat data yang terekam pada setiap waktunya. Seleksi data time series pada software *phoenix* dapat dilakukan hanya dengan mengubah waktu awal dan akhir akuisisi.

b. Frekuensi Series

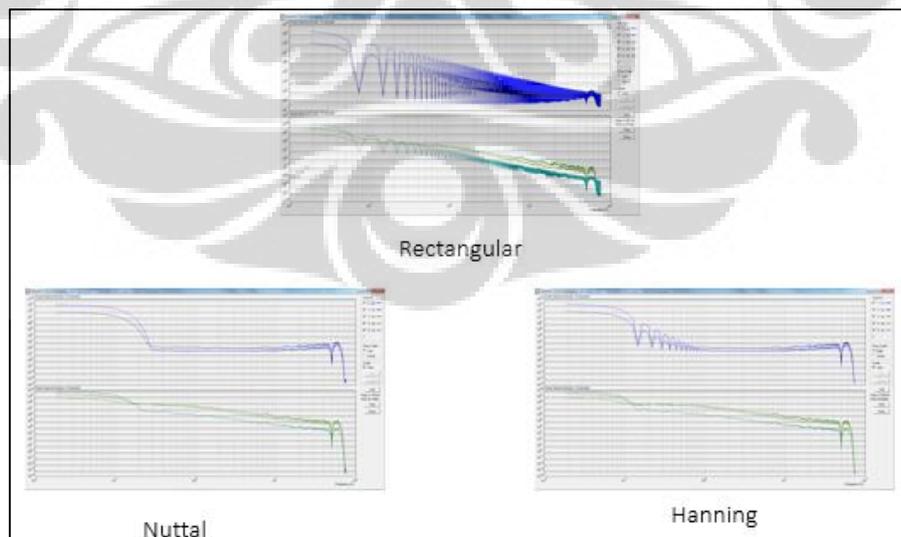
Transformasi fourier dilakukan untuk merubah data time series menjadi data frekuensi series. Melalui tahapan ini dapat ditentukan matriks spektrum yang dapat

digunakan sebagai parameter fungsi transfer. Pada tahap ini digunakan dua software yaitu software *Synchro Time Series Viewer* dan *SSMT 2000*.



Gambar 3. 17. Visualisasi Spektrum Frekuensi

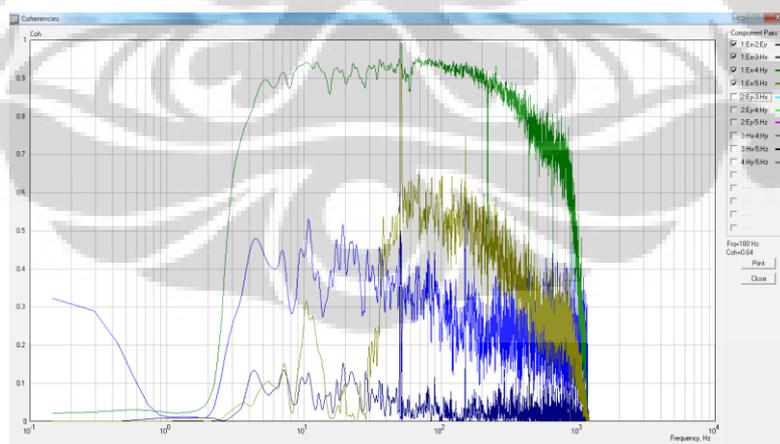
Proses transformasi fourier sangat dipengaruhi oleh algoritma window tapering yang digunakan. Dalam software Synchro TSV terdapat 3 opsi algoritma windows FFT yang dapat digunakan diantaranya rectangular, nuttal dan hanning. Responnya pada data adalah sebagai berikut.



Gambar 3. 18. Pilihan Jenis Window Tapering pada Sistem Phoenix

Software *SSMT 2000* dapat memfilter data yang dipengaruhi oleh *noise* berdasarkan hasil inspeksi noise pada tingkat time series yang dilakukan pada software *Synchro Time Series Viewer*. Proses pengeliminasian noise pada tingkat ini dikontrol oleh parameter *robust*, koherensi, dan *rho-variance*. Koherensi dapat memberikan gambaran sederhana mengenai relasi antar data antar komponen medan listrik atau magnetik. Proses filterisasi dengan menggunakan koherensi juga dilakukan berdasarkan hasil inspeksi koherensi yang dilakukan dengan menggunakan *Synchro Time Series Viewer*.

Dalam pengolahan data MT koherensi adalah statistik yang dapat digunakan untuk menguji hubungan antara dua sinyal atau data set. Hal ini biasanya digunakan untuk memperkirakan fungsi transfer antara input dan output dari sistem linear. Untuk pengolahan data dengan menggunakan *remote reference*, koherensi merujuk pada skema pengolahan data yang membandingkan data hasil survei di lokasi dengan data referensinya dan hanya memproses data-data yang koheren. *Cultural noise* yang muncul di lokasi pengukuran namun tidak pada daerah referensi akan dikurangi secara otomatis. *Rho-variance* mengacu pada tahap kedua dari *coherency* pengolahan data yang membandingkan hasil tellurik dan magnetik dari tahap pertama, dan menyeleksi data-data hasil tersebut yang koheren. Terdapat dua jenis koherensi yaitu koherensi multipel dan parsial.



Gambar 3. 19. Visualisasi Koherensi Antar Komponen Pada Synchro TSV

Dalam menentukan koherensi ataupun *variance* data-data, dibuat nilai minimum koherensi dan *variance*. Ketika nilai minimum telah terpenuhi maka,

program secara otomatis akan bergerak ke frekuensi berikutnya. Nilai minimum koherensi dan *variance* dapat ditentukan antara nilai 0 dan 1. Untuk keefektifan nilai minimum ini mempunyai range 0.9, untuk data yang mengandung banyak *noise*, sampai 0.8 untuk data yang mengandung sedikit *noise*. Parameter lain yang digunakan untuk memfilter data adalah nilai fraksi maksimum data yang bisa dihilangkan untuk mencapai nilai minimum koherensi ataupun *variance*. Nilai ini mempunyai range antara 0 (tidak ada *crosspower* yang dihilangkan) dan 1 (semua *crosspower* dihilangkan). Namun demikian, untuk keefektifan biasanya digunakan range 0.75 untuk data yang mengandung banyak *noise* dan 0.25 untuk data dengan sedikit *noise*.

Time series dibagi menjadi segmen-segmen berukuran sama ketika menghitung titik-titik data untuk setiap frekuensi. Jumlah segmen tersebut ditentukan berdasarkan jumlah *crosspower* yang diinginkan. Pengaturan segmen ini menyebabkan satu frekuensi memiliki banyak nilai. Nilai-nilai yang ada pada satu frekuensi ini akan dirataratakan atau *distack* untuk menghasilkan satu titik data pada satu frekuensi kurva resistivitas dan fase. Kurva yang mengandung banyak *error bar* dan tidak merepresentasikan kurva teoritis (seperti kurva tipe H, K, dan lain sebagainya) dapat ditangani dengan memanfaatkan fitur seleksi *crosspower*.

Titik-titik data dalam tiap frekuensi diolah dengan pembobotan tertentu. Tipe pembobotan dapat berupa *rho-variance* dan *ordinary coherency*. Pada tipe pembobotan *rho-variance*, titik-titik data dengan *error bar* yang kecil akan diberi bobot lebih besar dan begitu pula untuk kebalikannya. Sedangkan pada tipe *ordinary coherency*, titik-titik data dengan koherensi yang mendekati suatu nilai (misalkan 1) antara medan listrik dan medan magnet akan diberikan bobot yang lebih besar dan sisanya dipukul rata. Selain itu terdapat pula tipe *No Weight*, dimana semua titik data diberi bobot yang sama. Tipe pembobotan ini sangat berguna untuk data yang mengandung *noise* yang tidak koheren pada medan listrik dan magnetik seperti *spike noise*.

c. Fungsi Transfer

Pada tahap ini pengolahan data dilakukan dengan menggunakan software SSMT 2000 dan MTEditor dimana software ini mengambil input berupa data

crosspower (ekstensi *.MTH dan *.MTL) dalam bentuk fungsi transfer impedansi yang diperoleh dari hasil pengolahan menggunakan software SSMT 2000. Kemudian data ini dapat dikonversi menjadi data kurva resistivitas dan fase, diagram polar, vektor induk dan tipper analisis menggunakan software MTEditor.

Proses rotasi untuk akuisisi yang belum sejajar dengan arah strike regional dilakukan juga pada tahap ini. Fitur unggulan yang dimiliki MTEditor adalah seleksi data cross power dengan cara membentuk *masking* terhadap nilai crosspower yang tidak menghasilkan trend nilai resistivitas dan fase sesuai dengan yang diharapkan. Nilai fungsi transfer yang dibentuk melalui matriks spektra dapat membentuk data resistivitas semu berdasarkan kombinasi data crosspower. Pembobotan terhadap masing-masing nilai crosspower didasarkan pada tingkat koherensi terhadap *rho variance*, *ordinary cohrency*, atau *no weight* sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Berikut ini adalah beberapa tampilan pengolahan data pada MTEditor.



Gambar 3. 20. Kurva resistivitas (kiri atas) dan fase (kiri bawah) beserta data crosspowernya (kanan).

Setelah sampai pada tahap ini pengolahan lebih lanjut biasanya dilakukan seleksi crosspower dan konversi data menjadi format EDI sebagai data inputan pada proses inversi.

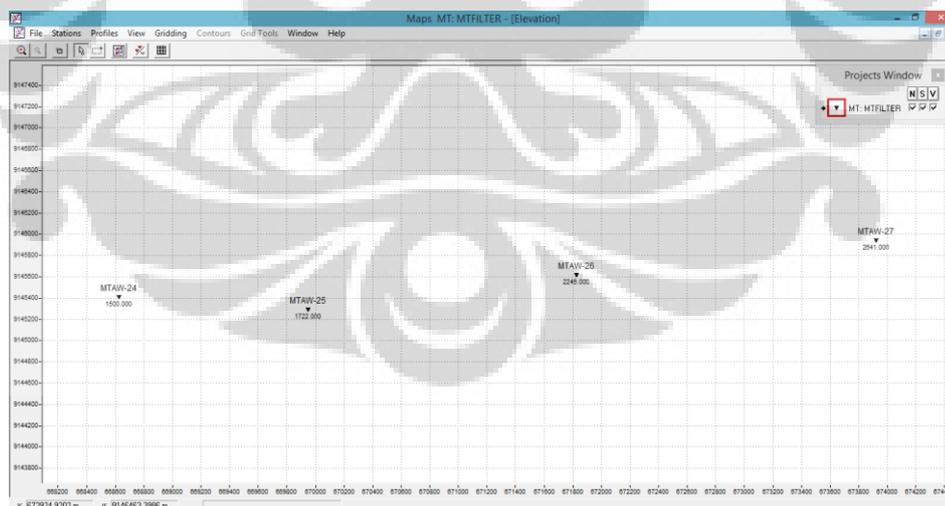
3.5 Inversi dan Visualisasi

Inversi 2D dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan distribusi resistivitas bawah permukaan dalam bentuk profil 2 dimensi sehingga kondisi geologis di bawah permukaan bumi dapat diketahui. Proses inversi ini dilakukan dengan menggunakan software WinGlink.

Proses inversi diawali dengan membuat *project* serta memasukan data EDI disertai dengan data koordinat dari semua stasiun (latitude, longitude, dan elevasi).

Sebelum dilakukan proses inversi, data akan dikoreksi statik terlebih dahulu dengan menggunakan data TDEM atau proses perhitungan geostatistik (*averaging* atau *cockriging*). Proses koreksi menggunakan data TDEM dapat dilakukan pada software WinGlink sedangkan proses perhitungan geostatistik dapat dilakukan pada software StaticShifter-X.

Setelah data dikoreksi statik, proses dilanjutkan dengan pembuatan line yang nantinya akan menjadi acuan dalam proses inversi profil 2D. Pembuatan line yang dimaksud adalah menentukan lintasan berdasarkan titik-titik stasiun yang ada. Gambar dibawah menunjukkan pembuatan line dilakukan dengan memilih menu “Maps” yang berrada di dalam menu utama software WinGlink .

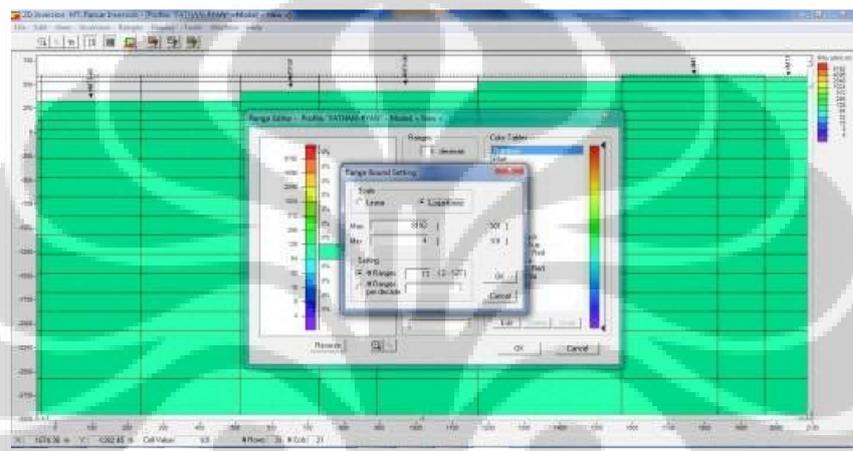


Gambar 3. 21. Sebaran stasiun pengukuran

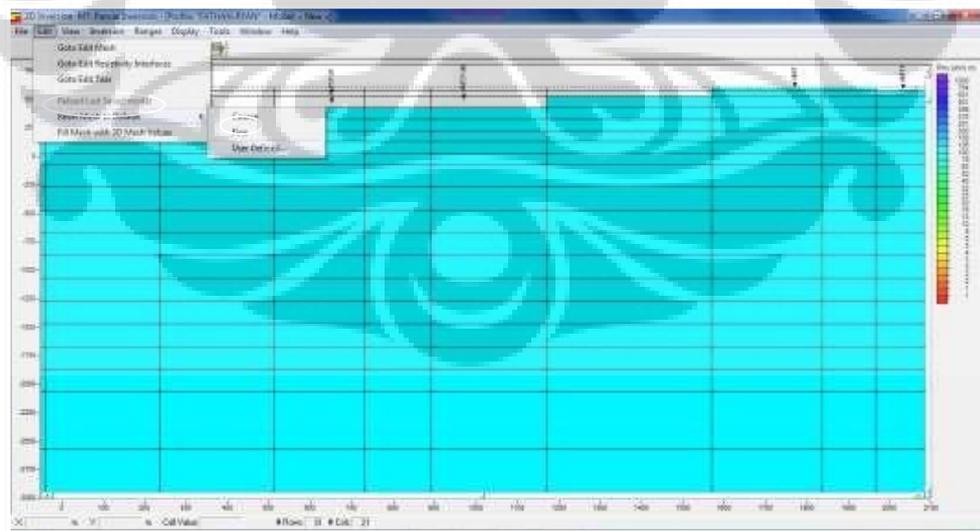
Gambar diatas menunjukkan sebaran titik-titik stasiun. Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah membuat line yang telah dibuat tadi dan memilih titik-titik

stasiun mana saja yang ingin dilibatkan dalam perhitungan inversi. Untuk membuat line tersebut, kita dapat memilih menu profile dan memilih submenu add profile trace. Untuk memilih stasiun yang ingin dijadikan dalam satu line, dapat memilih menu mouse selection.

Untuk melakukan proses inversi 2D dilakukan dengan memilih menu “2D Inversion” pada menu utama di dalam software WinGlink. Setelah itu, software akan meminta lintasan mana yang ingin dilakukan proses inversi 2D.



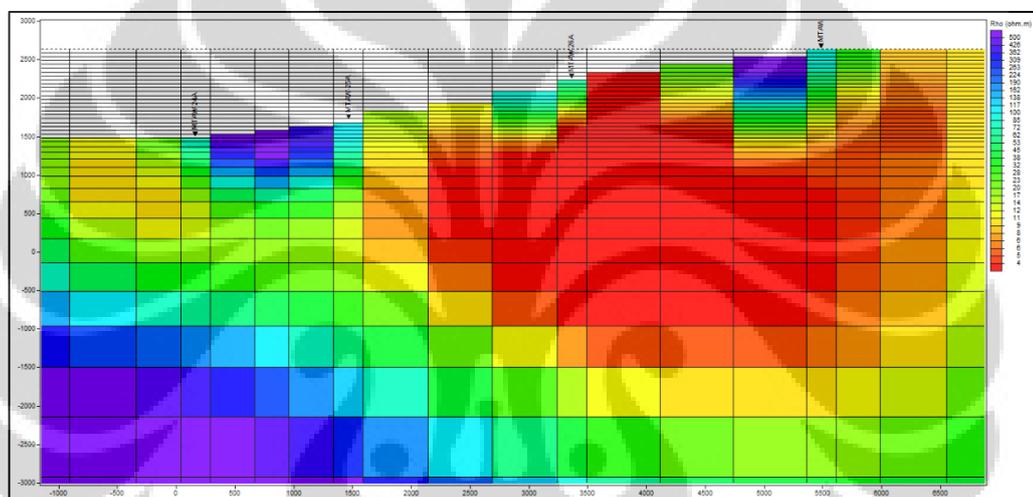
Gambar 3. 22. Pemberian *Range* Warna.



Gambar 3. 23. Penentuan *Mesh Grid*.

Untuk keperluan visualisasi kita dapat melakukan pengaturan terhadap range warna, mengatur batas atas, bawah, kanan, dan kiri dari tampilan inversi, serta menentukan mesh grid. Mesh grid yang digunakan proses inversi ini adalah Fine.

Tahap terakhir untuk melakukan proses running inversi dilakukan dengan memilih menu “Inversion” serta memilih submenu “Run Smooth Inversion”. Sebelum proses running berjalan, software akan meminta konfirmasi jumlah iterasi yang kita inginkan untuk dijalankan. Jumlah iterasi dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan statistik nilai *rms error* yang diharapkan. Dibawah ini merupakan salah satu hasil inversi yang dilakukan.



Gambar 3. 24. Contoh Hasil inversi.

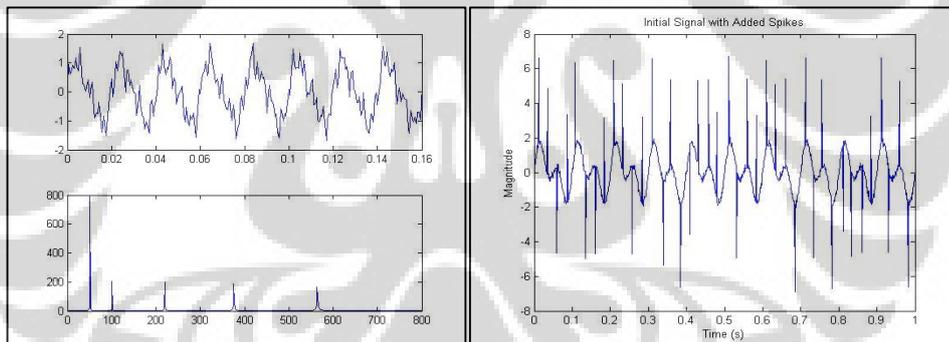
Hasil inversi perlu dilakukan pada penelitian ini karena tahap ini merupakan tahap yang paling ditunggu bagi para interpretator. Penelitian ini juga akan menganalisis hasil inversi dari *output* pengolahan data dengan menggunakan MTFilter dan SSMT 2000.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis dan Komparasi Data *Time Series* dan *Frequency Series*

Secara garis besar pengujian program dilakukan pada 2 tipe sintetik dimana data sintetik ini terdiri dari sinyal sintetik yang terkontaminasi *harmonic powerline noise* dan sinyal sintetik yang terkontaminasi *spike noise*. Sinyal-sinyal sintetik tersebut kemudian difilterisasi menggunakan filter yang telah dibuat sebelumnya untuk melihat kualitas (*benchmark*) dari program dalam mengeliminasi *noise*.

Setelah memenuhi kualifikasi yang diharapkan, filter yang dibangun didalam program MTFilter diuji dengan menggunakan 3 tipe data lapangan dengan masing-masing terdiri dari data yang terkontaminasi *harmonic powerline noise*, data yang terkontaminasi *spike noise* dan data yang memiliki *spike noise* yang yang ekstrem (untuk seleksi data *time series*).

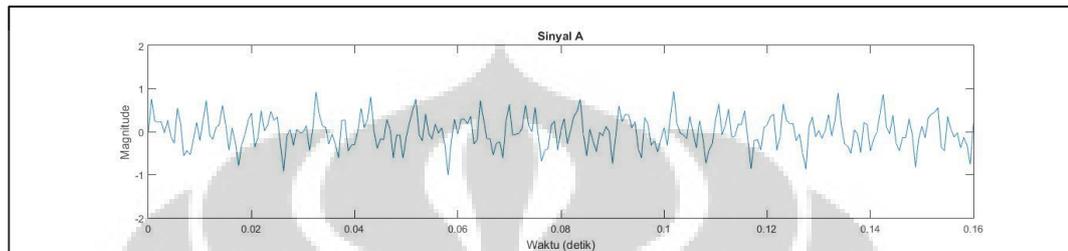


Gambar 4. 1. Sinyal Sintetik A yang Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise* (kiri)
Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi *Spike Noise* (kanan)

Melalui sinyal sintetik ini kualitas filter dan program diukur dengan menggunakan empat parameter, diantaranya inspeksi visual, autokorelasi, koherensi, dan analisis spektra. Parameter inspeksi visual dan analisis spektra merupakan parameter yang menjadi titik ukur untuk melihat efektivitas filter dalam mengeliminasi *noise* secara kualitatif sedangkan autokorelasi dan koherensi berperan sebagai titik ukur untuk melihat kualitas filter secara kuantitatif.

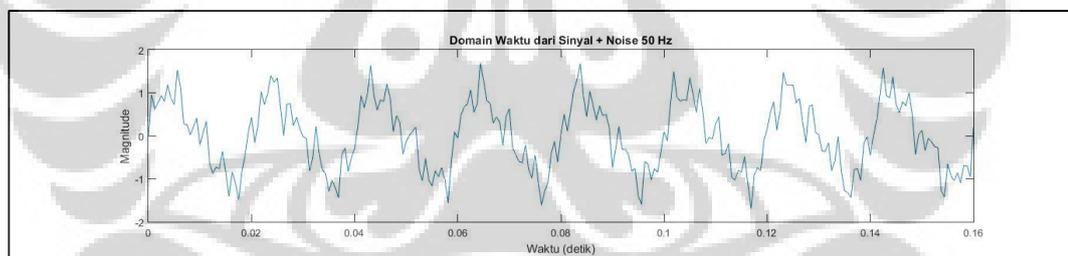
4.1.1 Inspeksi Visual

Sinyal A merupakan sinyal frekuensi tinggi yang sinyal hasil superposisi gelombang 100 Hz, 219 Hz, 375 Hz, dan 563 Hz. Pembuatan sinyal ini dilakukan untuk dikontaminasi dengan *harmonic powerline noise* yang berfrekuensi 50 Hz sesuai dengan aliran kabel listrik PLN di Indonesia.



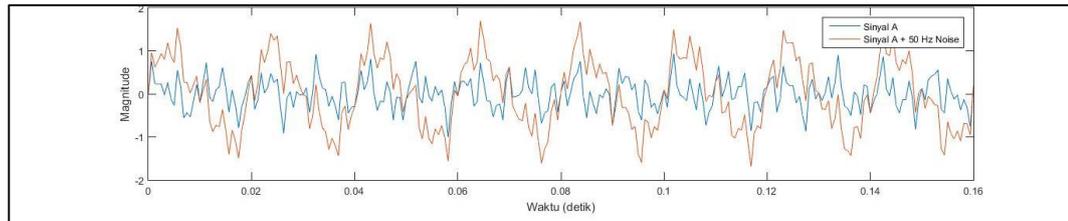
Gambar 4. 2. Sinyal Sintetik A Hasil Superposisi Gelombang 100 Hz, 219 Hz, 375 Hz, dan 563 Hz.

Sinyal A kemudian disuperposisikan dengan gelombang 50 Hz yang memiliki amplitudo empat kali lebih besar dibandingkan amplitudo sinyal A. Sehingga sinyal A menjadi seperti pada gambar dibawah ini.



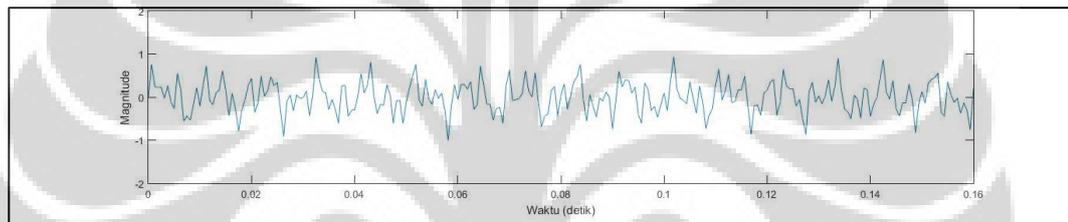
Gambar 4. 3. Sinyal Sintetik A yang Terkontaminasi Noise *Powerline* 50 Hz

Jika dibandingkan dengan sinyal A sebelum disuperposisikan dengan gelombang 50 Hz, sinyal berubah secara signifikan. Dengan demikian, selain menggunakan analisis spektrum, sinyal MT yang terkontaminasi *harmonic powerline noise* ternyata dapat teridentifikasi melalui inspeksi visual data time series dengan munculnya pola seperti pada Gambar 4. 3. Untuk melihat komparasi antara sinyal A sebelum dan sesudah disuperposisi dengan gelombang 50 Hz, dapat dilihat Gambar 4. 4 dibawah ini.



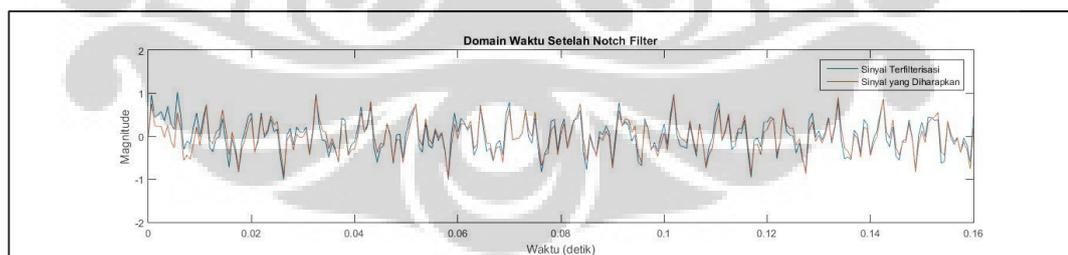
Gambar 4. 4. Komparasi Antara Sinyal A Tanpa *Harmonic Powerline Noise* dan Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise*

Setelah teridentifikasi bahwa sinyal A telah terkontaminasi *harmonic powerline noise* selanjutnya dilakukan proses filterisasi dengan menggunakan *notch filter* dengan spesifikasi yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1. Hasil filterisasi sinyal A ditampilkan melalui Gambar 4. 5 berikut.



Gambar 4. 5. Sinyal Hasil Filterisasi Menggunakan *Notch Filter*

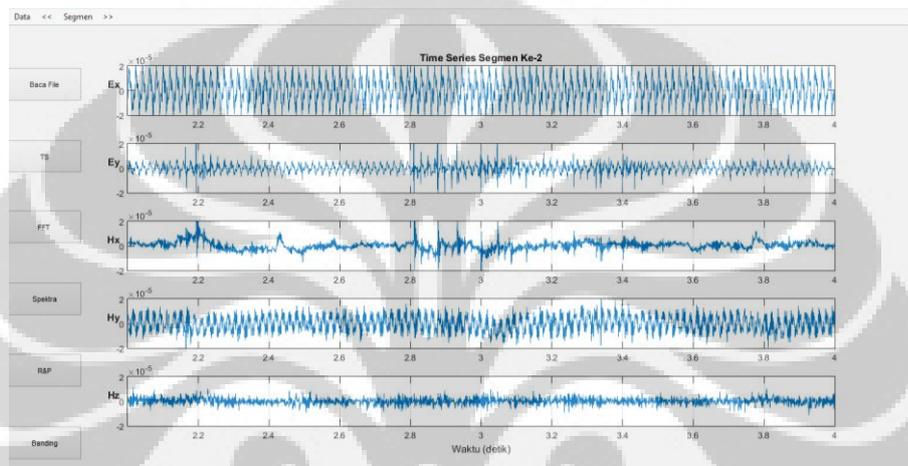
Untuk melihat komparasi antara sinyal A dengan sinyal hasil filterisasi dapat dilihat melalui Gambar 4. 6 berikut.



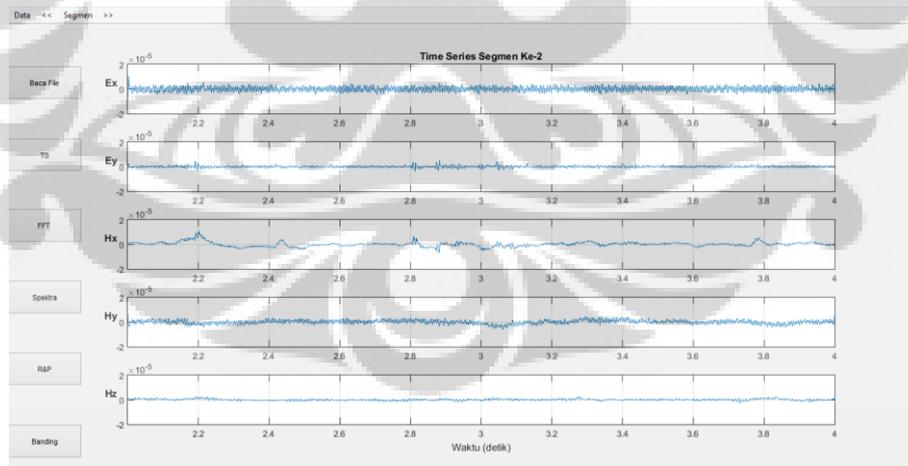
Gambar 4. 6. Komparasi Antara Sinyal A dengan Sinyal A Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise* yang telah Difilterisasi oleh *Notch Filter*

Sinyal A dengan sinyal hasil filterisasi ternyata memiliki sedikit perbedaan, dimana terlihat pada Gambar 4. 6 diatas sinyal hasil filterisasi memiliki amplitudo yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan amplitudo sinyal A sebelum

dikontaminasi *harmonic powerline noise* (50 Hz). Hal ini terjadi kemungkinan disebabkan oleh durasi sinyal yang kurang panjang sehingga ketika pada proses inversi FFT data mengalami penurunan amplitudo. Akan tetapi, panjang sinyal mencapai nilai tak terhitung yang dapat memberikan nilai yang tepat secara teoritis. Namun tujuan utama analisis inspeksi time series ini adalah melihat pengaruh *harmonic powerline noise* 50 Hz. Sehingga durasi sinyal sintetis untuk sementara dijadikan sebagai pertimbangan kedua.



Gambar 4. 7. Data Lapangan yang Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise*

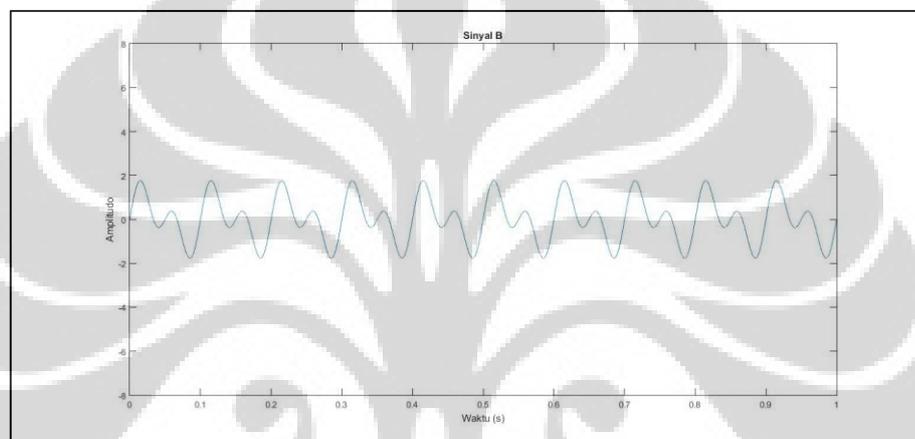


Gambar 4. 8. Contoh Implementasi *Notch Filter* Pada Data Lapangan.

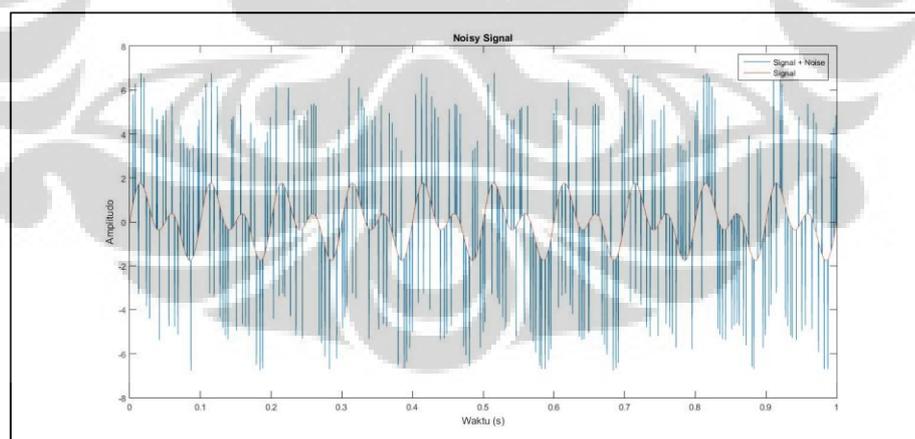
Gambar 4. 7 merupakan visualisasi salah satu contoh data lapangan dimana pada data ini ditemukan pola yang mirip seperti pada Gambar 4. 3 terutama pada komponen medan listrik Ex dan medan magnetik Hy. Gambar 4. 8 menunjukkan

hasil filterisasi data lapangan dengan menggunakan *notch filter* dan *median filter*. Secara kualitatif terlihat bahwa sinyal MT hasil filterisasi sudah tidak lagi mengandung pola seperti pada Gambar 4. 3 dan sinyal lebih bebas dari *spike noise*.

Selanjutnya pembuatan sinyal sintetik B dilakukan dengan mensuperposisikan antara gelombang berfrekuensi 10 Hz dan 20 Hz. Pembuatan sinyal sintetik B dimaksudkan untuk menguji filter dalam mengeliminasi *spike noise*.



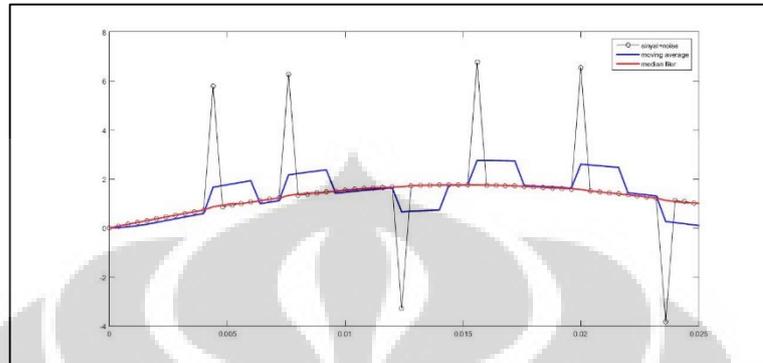
Gambar 4. 9. Sinyal Sintetik B Hasil Superposisi Gelombang 10 dan 20 Hz



Gambar 4. 10. Sinyal B yang Terkontaminasi *Spike Noise*

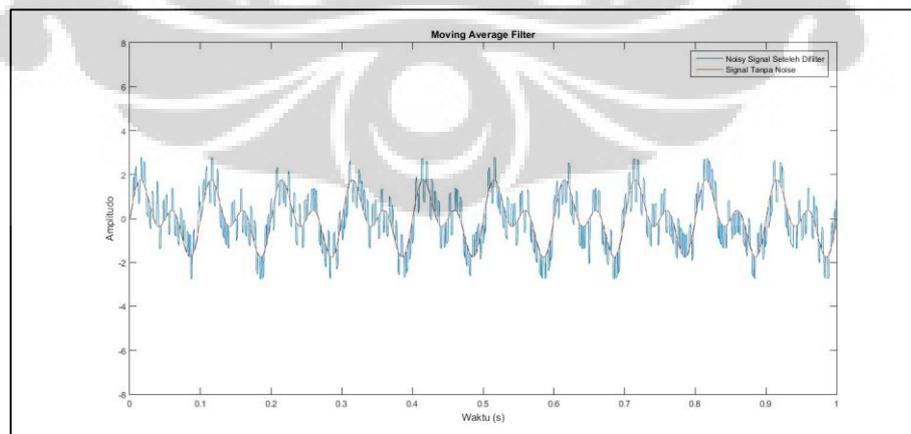
Gambar 4. 10 menunjukkan sinyal B yang terkontaminasi *spike noise*. Untuk mengeliminasi noise ini secara teoritis dapat digunakan dua jenis filter, yaitu *median filter* dan *moving average filter*. Kedua filter ini terkenal akan fungsinya

yang dapat mengeliminasi nilai anomali amplitudo pada data yang dikenal sebagai *spike*. Namun, untuk melihat komparasi kedua filter tersebut dalam mengeliminasi *spike* noise dapat dilihat Gambar 4. 11 berikut ini.

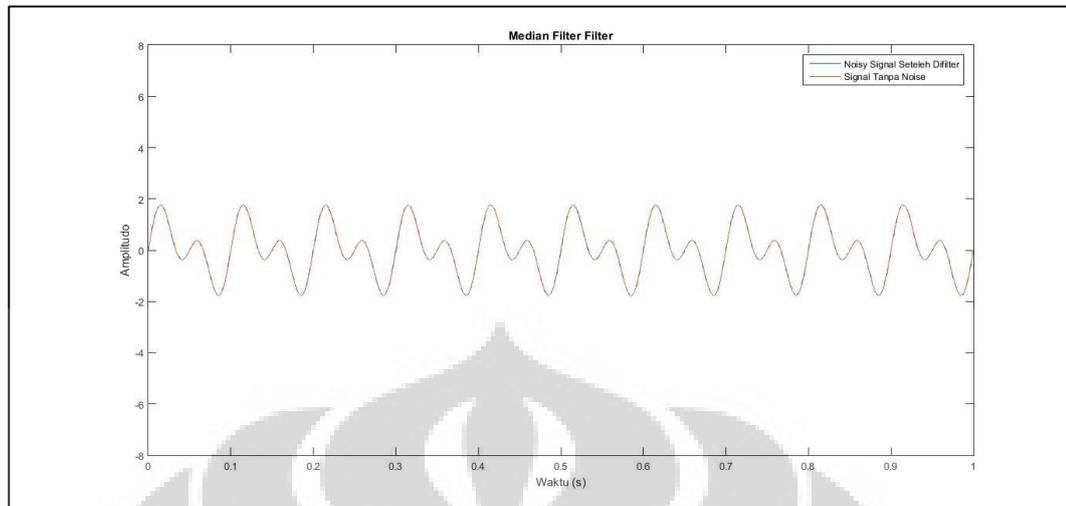


Gambar 4. 11. Komparasi *Median Filter* dengan *Moving Average Filter*

Pada gambar diatas terlihat bahwa garis dan bulatan abu-abu merepresentasikan titik data sinyal yang terkontaminasi noise. Garis biru merupakan hasil filterisasi menggunakan *moving average* sedangkan garis merah merupakan hasil filterisasi menggunakan *median filter*. Terlihat bahwa *median filter* berhasil mengeliminasi titik yang mengalami anomali amplitudo dan garis merah ini mengenai semua titik sinyal sesuai. Secara lebih aplikatif kedua filter ini kemudian diterapkan untuk memfilterisasi sinyal sintetik B dengan hasil sebagai berikut.



Gambar 4. 12. Hasil Filterisasi Sinyal B yang Terkontaminasi *Spike Noise*
Menggunakan *Moving Average Filter*



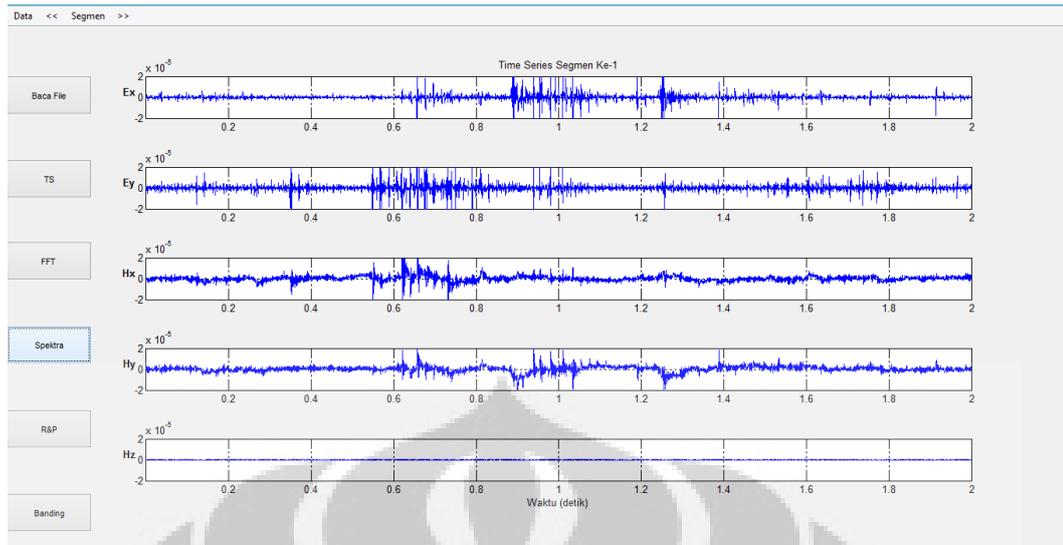
Gambar 4. 13. Hasil Filterisasi Sinyal B yang Terkontaminasi *Spike Noise* Menggunakan *Median Filter*

Pada Gambar 4. 12 dan Gambar 4. 13 terlihat bahwa garis orange merupakan sinyal B yang tidak terkontaminasi noise dan garis biru merupakan hasil filterisasi menggunakan filter digital (*moving average* atau *median filter*). Berdasarkan inspeksi visual terlihat bahwa hasil filterisasi menggunakan *median filter* lebih sesuai dengan sinyal B yang sesungguhnya. Dengan demikian, *median filter* digunakan pada program MTFilter sebagai *spike eliminator*.

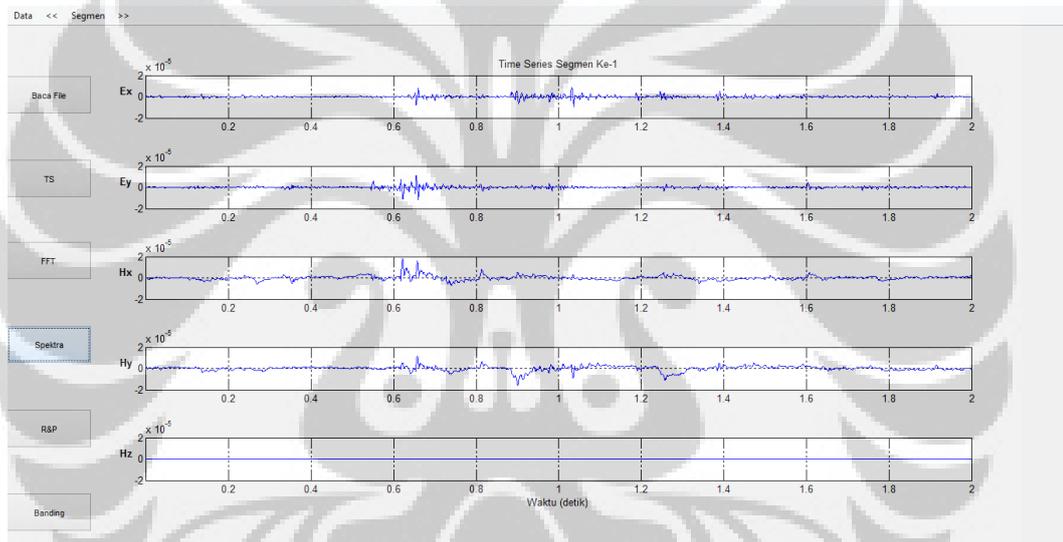
Data lapangan yang digunakan pada penelitian ini diambil dari 4 data yang terkontaminasi *spike noise*. Namun, untuk keperluan dokumentasi pada skripsi ini hanya ditampilkan satu segmen saja sebagai ilustrasi data sebelum difilterisasi dan sesudah difilterisasi dengan menggunakan *median filter* yang berperan sebagai *spike eliminator*.

Median filter yang digunakan pada filterisasi data lapangan menggunakan data ke- $n-2$, data ke- $n-1$, data ke- n , data ke- $n+1$, dan data ke- $n+2$, sehingga total data yang diproses untuk satu kali *looping* berjumlah lima data.

Pengujian pada salah satu segmen pada data lapangan divisualisasikan pada Gambar 4. 14 berikut.



(a)



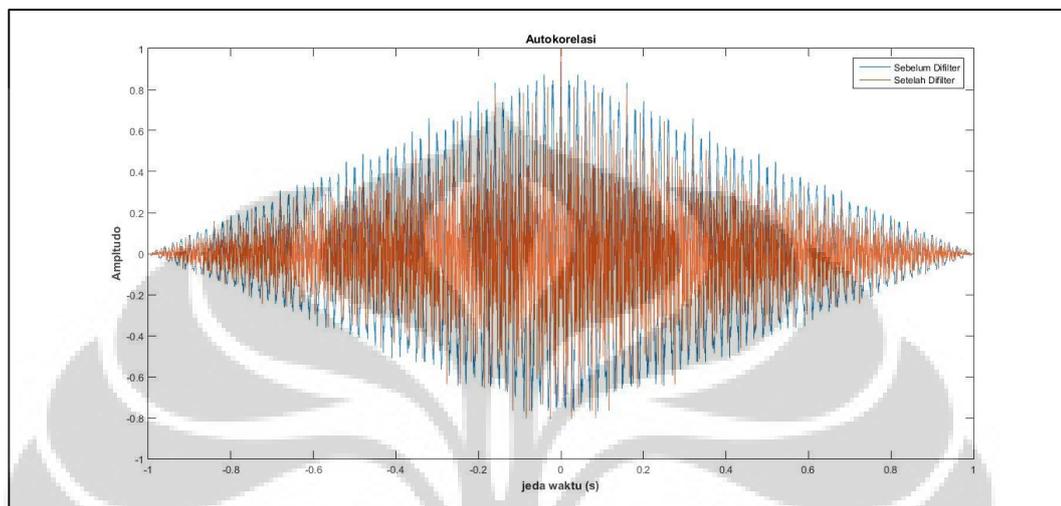
(b)

Gambar 4. 14. Contoh Implementasi *Median Filter* Pada Data Lapangan. (a) Sebelum difilterisasi (b) Setelah Difilterisasi

Dari pengujian pada data lapangan ini *spike noise* yang relatif besar masih belum dapat dieliminasi secara sempurna oleh *median filter*. *Spike noise* yang belum terfilterisasi dengan baik ini dapat dieliminasi dengan menggunakan seleksi data time series.

4.1.2 Autokorelasi

Autokorelasi pada sinyal sintetik A dihitung sebagai acuan dalam menganalisis data lapangan. Nilai autokorelasi sinyal sintetik ini divisualisasikan melalui Gambar 4. 15 berikut ini.

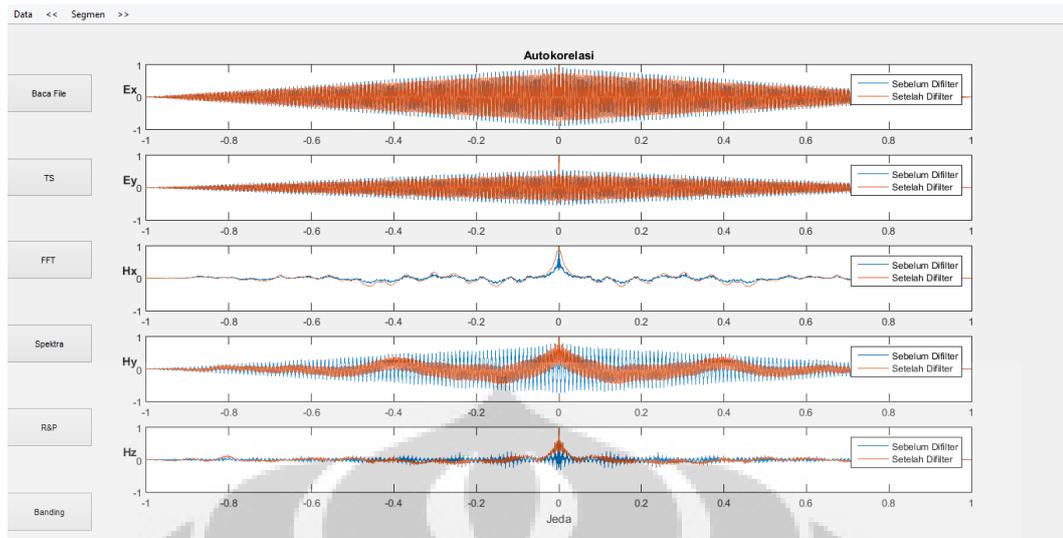


Gambar 4. 15. Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik A yang Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise* Sebelum dan Sesudah Difilterisasi

Pada gambar diatas terlihat garis biru merupakan nilai autokorelasi dari sinyal sintetik A sebelum difilterisasi sedangkan garis orange merupakan nilai autokorelasi dari sinyal setelah difilterisasi. Berdasarkan hasil ini, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa autokorelasi dari data yang mengandung *harmonic powerline noise* cenderung lebih besar dibandingkan yang tidak, hal ini terjadi karena *harmonic powerline noise* merupakan gelombang sinusoidal beramplitudo tinggi dan bersifat periodik sehingga dapat meningkatkan nilai autokorelasi.

Dengan mengasumsikan bahwa karakteristik sinyal pada data lapangan tidak jauh berbeda dengan data sintetik maka bentuk autokorelasi pada data sintetik dapat dijadikan panduan dalam menganalisis bentuk autokorelasi pada data lapangan. Terdapat dua data lapangan yang difilterisasi menggunakan *notch filter* pada penelitian ini. Namun untuk keperluan dokumentasi penulis hanya menampilkan salah satunya.

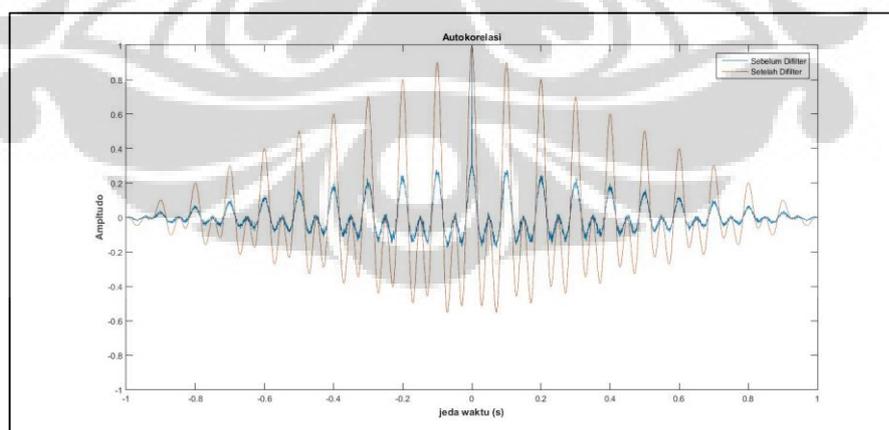
Implementasi autokorelasi pada data lapangan dapat dilihat melalui Gambar 4. 16 berikut ini.



Gambar 4. 16. Autokorelasi Pada Sinyal Data Lapangan yang Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise* Sebelum dan Sesudah Difilterisasi

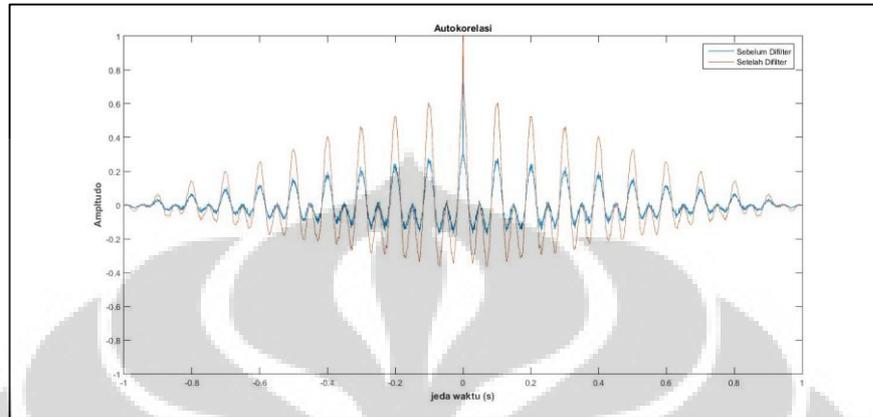
Seperti telah dijelaskan sebelumnya pengaruh *harmonic powerline noise* pada data lapangan cukup besar pada komponen E_x dan H_y sehingga nilai autokorelasi data sebelum difilter pada komponen E_x dan H_y menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan setelah difilter.

Autokorelasi secara teoritis sangat baik digunakan dalam menganalisis sinyal yang terkontaminasi *spike noise*. Berikut ini merupakan autokorelasi dari data sinyal sintetik B yang terkontaminasi *spike noise*.



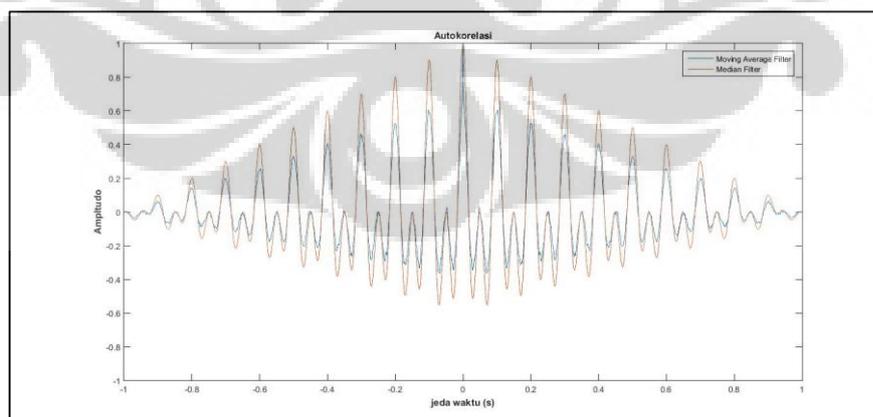
Gambar 4. 17. Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi *Spike Noise* Sebelum Dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan *Median Filter*

Dari gambar diatas terlihat bahwa autokorelasi dari data yang telah difilter menggunakan *median filter* memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibanding dengan data sintetik yang belum difilter.



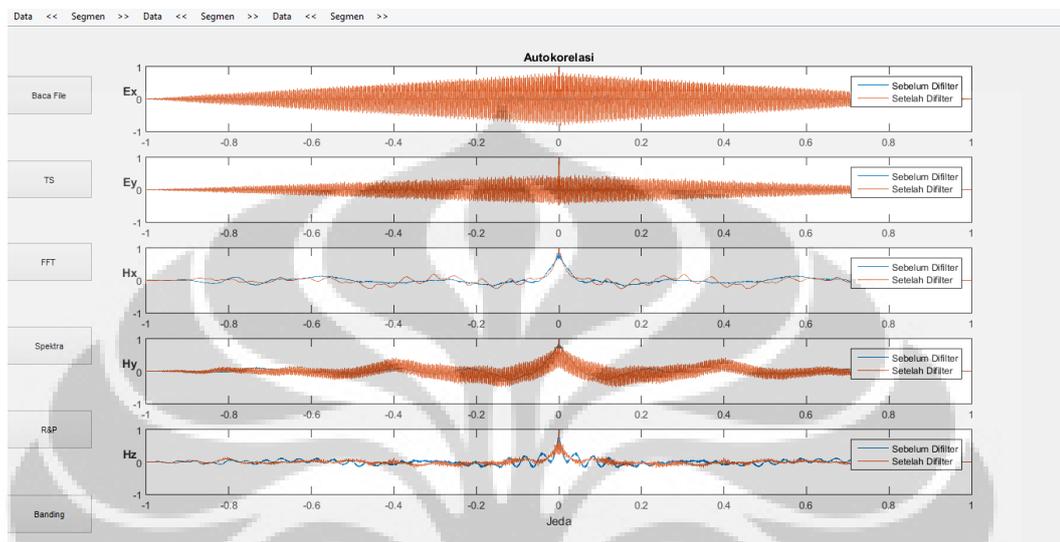
Gambar 4. 18. Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi *Spike Noise* Sebelum Dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan *Moving Average Filter*

Sama seperti Gambar 4. 17 terlihat bahwa autokorelasi dari data yang telah difilter menggunakan *moving average filter* memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibanding dengan data sintetik yang belum difilter. Namun, jika dikomparasi dengan *median filter*, autokorelasi yang dihasilkan oleh data yang telah difilter oleh *moving average filter* masih lebih kecil amplitudonya. Hal ini menguatkan kembali bahwa *median filter* lebih baik dibandingkan *moving average filter*



Gambar 4. 19. Komparasi Autokorelasi Pada Sinyal Sintetik B yang Terkontaminasi *Spike Noise* Sesudah Difilterisasi Menggunakan *Moving Average Filter* dan *Median Filter*

Dalam implementasinya pada data lapangan *median filter* sebagai *spike eliminator* terbukti dapat meningkatkan autokorelasi pada data disetiap komponen medan listrik dan magnetik sebagaimana digambarkan pada Gambar 4. 20 berikut ini.



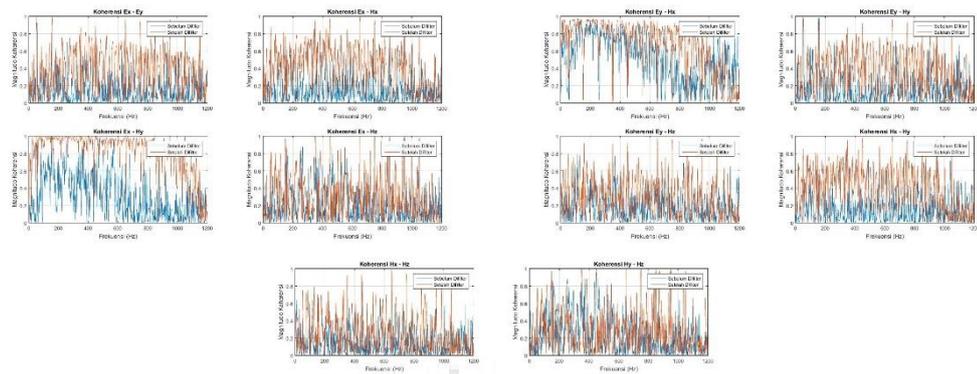
Gambar 4. 20. Autokorelasi Pada Sinyal Data Lapangan yang Terkontaminasi *Spike Noise* Sebelum dan Sesudah Difilterisasi

4.1.3 Koherensi

Analisis selanjutnya dilakukan dengan menggunakan parameter koherensi data lapangan. Perhitungan koherensi pada data sintetik tidak dapat dilakukan karena data sintetik dibuat tanpa adanya suatu hubungan yang bersifat linear seperti impedansi antara sinyal A dan sinyal B.

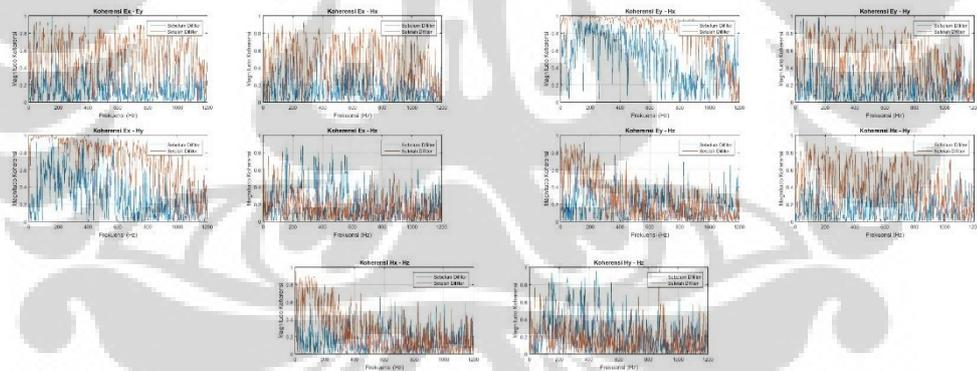
Dikarenakan koherensi tidak digunakan pada data sintetik maka panduan untuk menganalisis data lapangan hanya dilakukan dengan asumsi bahwa *noise* yang bersifat diskrit dan tidak saling berhubungan antara komponen medan listrik dan medan magnetik akan menurunkan nilai koherensi. Hal ini terjadi karena seperti dijelaskan pada bab landasan teori, bahwa *noise* pada data MT tidak memiliki keterkaitan pada masing-masing komponen medan melalui suatu fungsi linear impedansi.

Koherensi pada data lapangan diilustrasikan melalui Gambar 4. 21 dan Gambar 4. 22 berikut ini.



Gambar 4. 21. Koherensi Data Lapangan yang Terkontaminasi *Harmonic Powerline Noise* Sebelum dan Sesudah Difilterisasi

Gambar 4. 21 merupakan visualisasi dari data koherensi pada data lapangan yang terkontaminasi *harmonic powerline noise*. Secara umum dapat dianalisis bahwa data sebelum difilterisasi (garis biru) memiliki nilai koherensi yang lebih rendah dibandingkan setelah difilterisasi (garis orange) dengan demikian dapat ditarik kesimpulan bahwa *notch filter* dapat meningkatkan koherensi pada data yang berarti meningkatkan hubungan linear antar setiap komponen medan listrik dan magnetik.

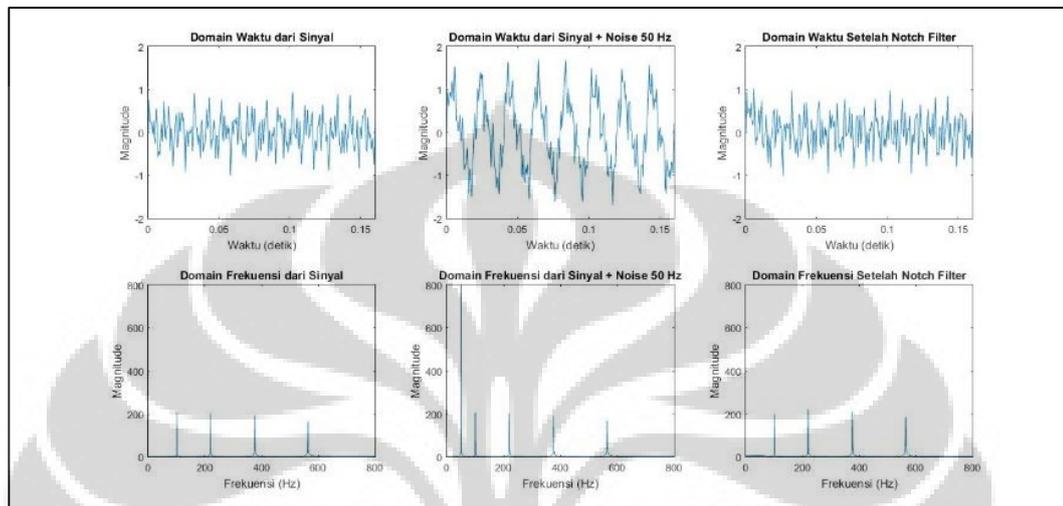


Gambar 4. 22. Koherensi Data Lapangan yang Terkontaminasi *Spike Noise* Sebelum dan Sesudah Difilterisasi

Gambar 4. 21 merupakan visualisasi dari data koherensi pada data lapangan yang terkontaminasi *harmonic powerline noise* sedangkan Gambar 4. 22 merupakan visualisasi dari data koherensi pada data lapangan yang terkontaminasi *spike noise*. Secara umum dapat ditarik kesimpulan bahwa *notch filter* dan *median filter* dapat meningkatkan koherensi pada data yang berarti meningkatkan hubungan linear antar setiap komponen medan listrik dan magnetik.

4.1.4 Analisis Spektra

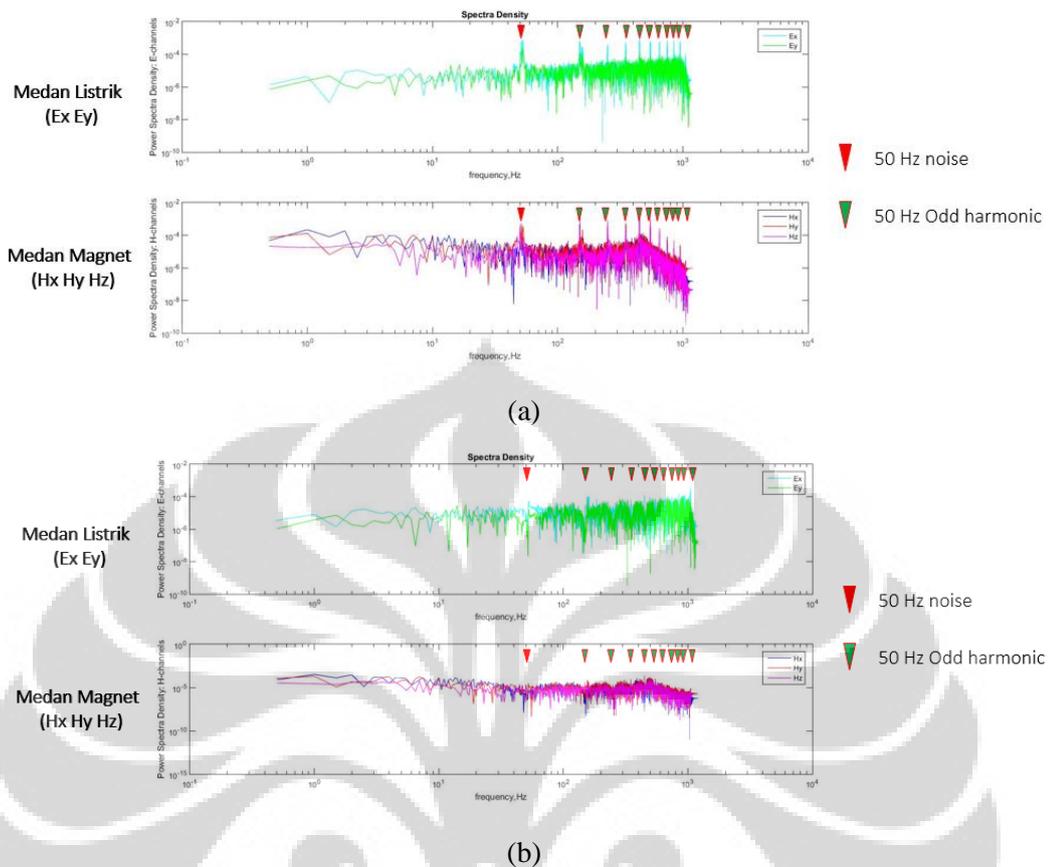
Analisis spektra dilakukan untuk menganalisis terutama pada data yang terkontaminasi *harmonic powerline noise*. Secara umum spektrum frekuensi dari data sintetik dan data lapangan diuraikan pada gambar-gambar dibawah ini.



Gambar 4. 23. Analisis Spektra pada Sinyal Sintetik A

Gambar 4.24 diatas menunjukkan spektrum frekuensi sinyal sintetik A yang belum dikontaminasi *harmonic powerline noise* (kiri), terkontaminasi *harmonic powerline noise* (tengah), dan setelah filterisasi (kanan). Dari gambar diatas terlihat bahwa spektrum frekuensi dari sinyal yang belum terkontaminasi *noise* tidak mengandung gelombang yang berfrekuensi 50 Hz. Pada data yang terkontaminasi *harmonic powerline noise* spektrum frekuensi menunjukkan adanya anomali data yang memiliki amplitudo empat kali dari nilai rata-rata frekuensi lainnya. Setelah filterisasi menunjukkan bahwa spektrum frekuensi kembali kekeadaan semula seperti sinyal sebelum terkontaminasi *noise*. Perbedaan signifikan terlihat pada durasi awal sinyal dimana perbedaan ini muncul karena adanya perbedaan fase antara data sebelum terkontaminasi *noise* dengan data setelah difilterisasi.

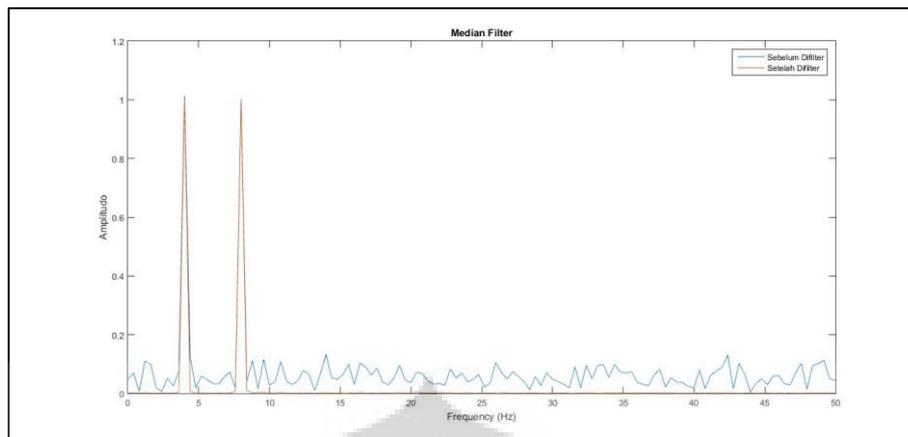
Analisis lebih lanjut pada data lapangan diilustrasikan melalui gambar 4.25 sebagai berikut:



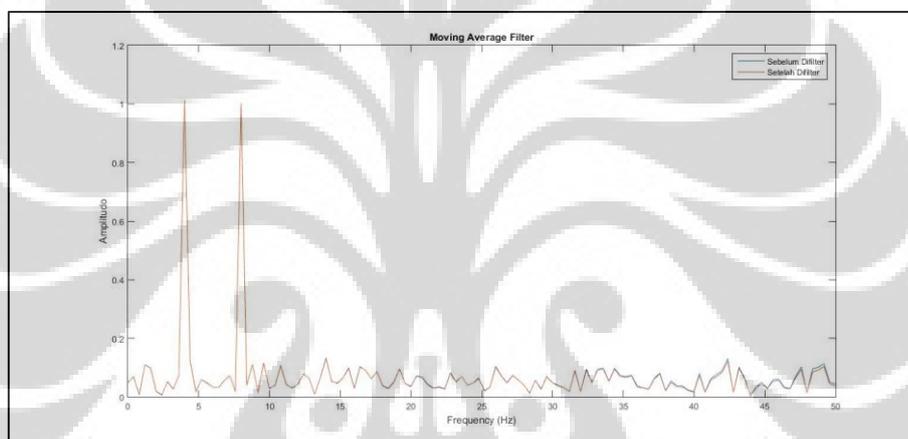
Gambar 4. 24. Contoh Implementasi *Notch Filter* Pada Data Lapangan. (a) Spektrum Sebelum difilterisasi (b) Spektrum Setelah Difilterisasi

Gambar diatas menunjukkan bentuk spektrum frekuensi pada data lapangan yang terkontaminasi *harmonic powerline noise* dimana spektrum frekuensi pada Gambar 4.25 (a) menunjukkan adanya anomali amplitudo pada frekuensi 50 Hz dan kelipatan bilangan ganjilnya. Anomali ini kemudian diinterpretasi sebagai *harmonic powerline noise*. Bentuk spektrum pada data setelah difilterisasi seperti terlihat pada Gambar 4.25 (b) menunjukkan bahwa anomali yang muncul pada frekuensi 50 Hz dan kelipatan bilangan ganjilnya telah berhasil dieliminasi tanpa menghilangkan sinyal sesungguhnya yang berada pada frekuensi tersebut.

Analisis selanjutnya adalah inspeksi spektrum frekuensi pada data sintetik B dan data lapangan yang terkontaminasi *spike noise*. Bentuk visualisasi data spektrum frekuensi diilustrasikan pada gambar berikut.

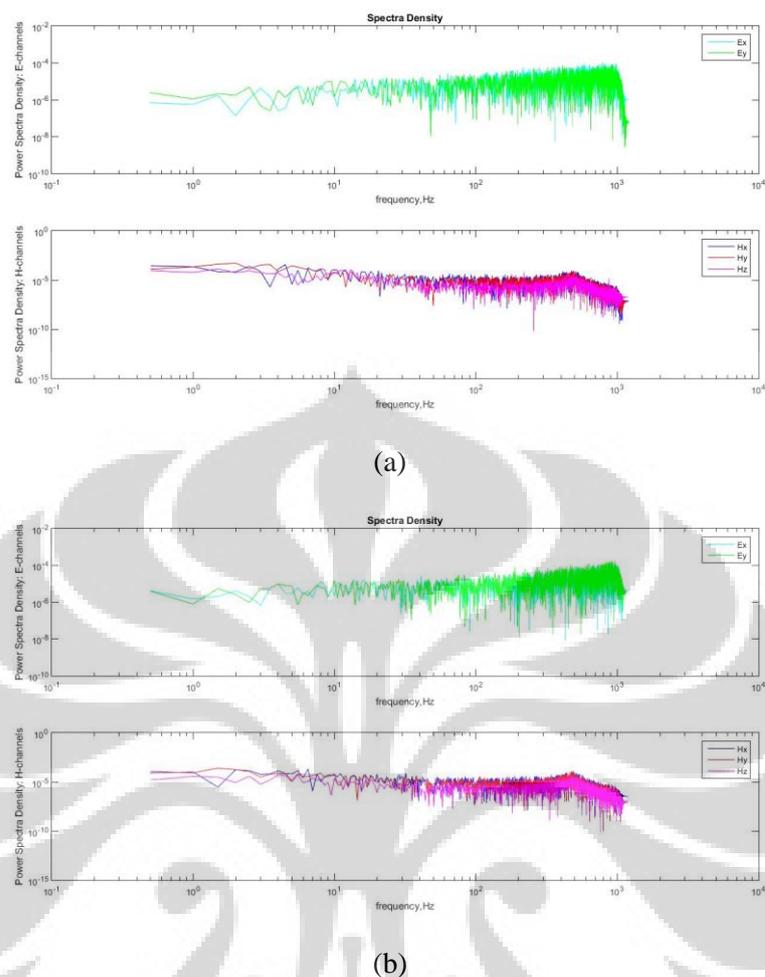


Gambar 4. 25. Analisis Spektra Sinyal Sintetik B Sebelum dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan *Median Filter*



Gambar 4. 26. Analisis Spektra Sinyal Sintetik B Sebelum dan Sesudah Difilterisasi Menggunakan *Moving Average Filter*

Seperti terlihat pada Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 diatas menunjukkan spektrum frekuensi sinyal sintetik B yang terkontaminasi *spike noise* ditunjukkan dengan garis warna biru, dan setelah filterisasi dengan garis warna orange. Dari gambar diatas terlihat bahwa spektrum frekuensi dari sinyal yang terkontaminasi *noise* memiliki data yang terganggu pada semua frekuensi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *spike noise* dapat mengkontaminasi data pada frekuensi manapun. Hasil filterisasi dengan menggunakan *median filter* terbukti menghasilkan data hasil filterisasi yang lebih baik dibandingkan dengan *moving average filter*.



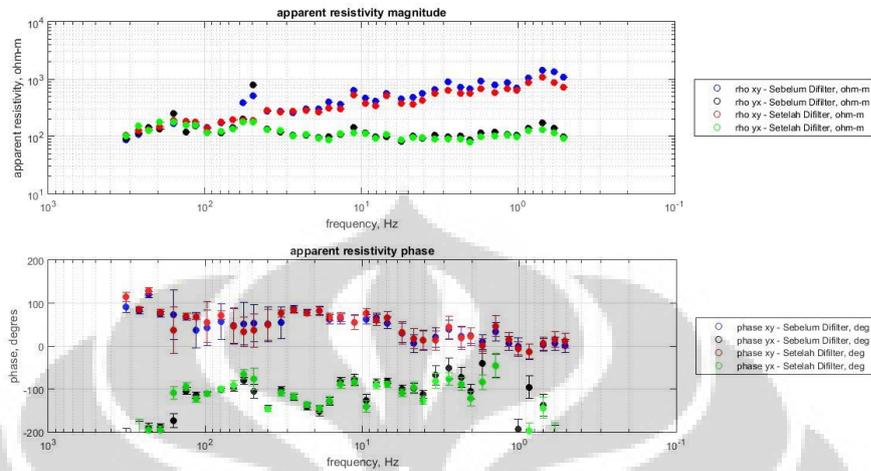
Gambar 4. 27. Contoh Implementasi *Notch Filter* Pada Data Lapangan. (a) Spektrum Sebelum difilterisasi (b) Spektrum Setelah Difilterisasi

Secara umum data spektrum frekuensi sangat membantu dalam memvisualisasikan *harmonic powerline noise* seperti terlihat pada Gambar 4. 23 dan Gambar 4. 24. Pada data sintetik sinyal B, *median filter* menghasilkan data spektrum frekuensi yang relatif tidak begitu berubah secara umum, hanya terjadi perubahan amplitudo yang kemungkinan baru terlihat dampaknya pada data impedansi.

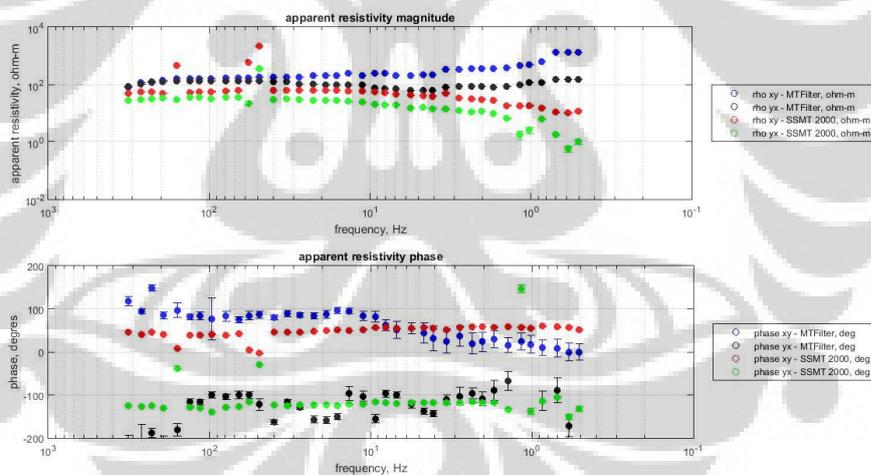
4.2 Analisis dan Komparasi Data Resistivitas Semu dan Fase

Sejalan dengan analisis sebelumnya analisis data pada kurva resistivitas semu dan fase menunjukkan *notch filter* dan *median filter* dapat meningkatkan kualitas

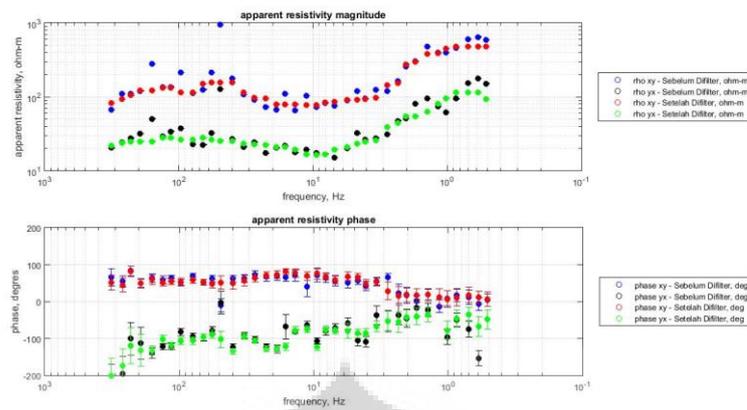
data. Namun, pada data fase yang diolah dengan menggunakan MTFilter masih belum dikalibrasi sehingga nilai yang diperoleh masih perlu dikaji lebih dalam.



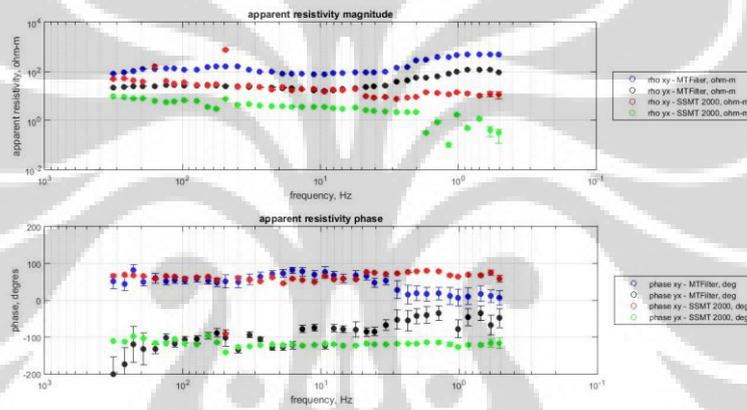
Gambar 4. 28. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 1 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan *Notch Filter*



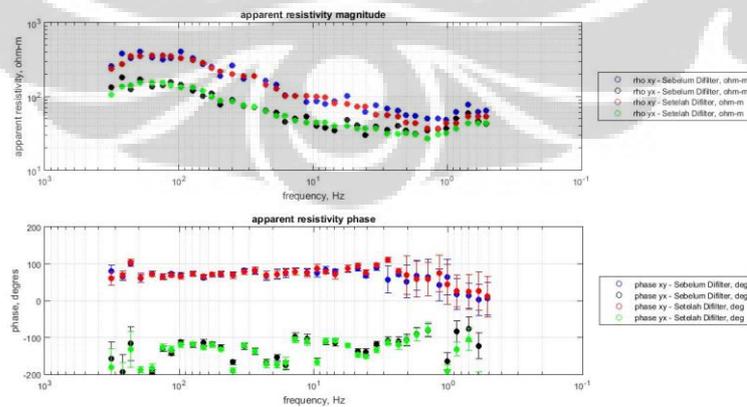
Gambar 4. 29. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 1 yang Diolah Menggunakan MTFilter dan SSMT 2000



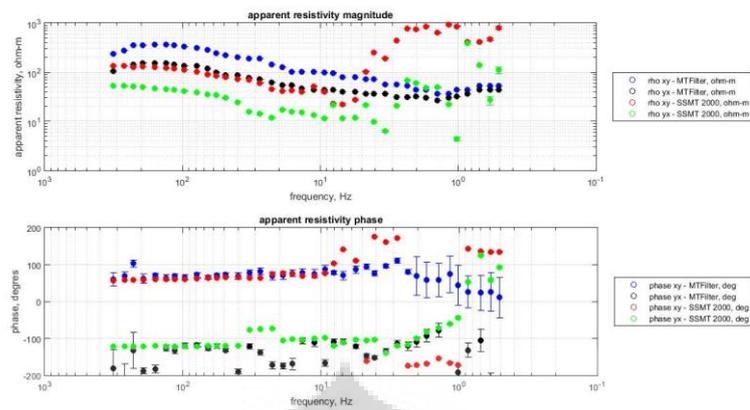
Gambar 4. 30. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 2 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan *Notch Filter*



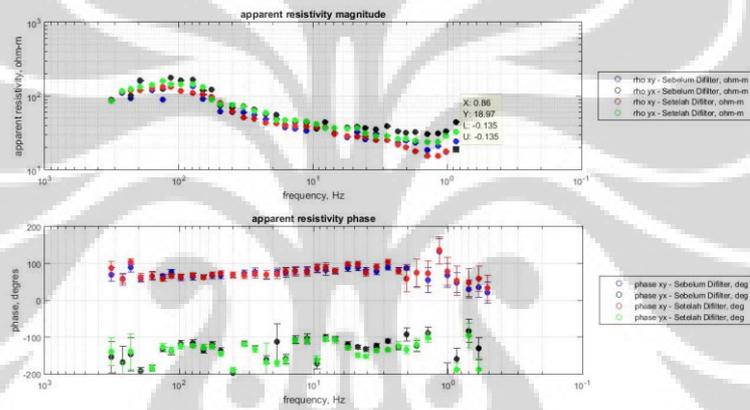
Gambar 4. 31. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 2 yang Diolah Menggunakan MFilter dan SSMT 2000



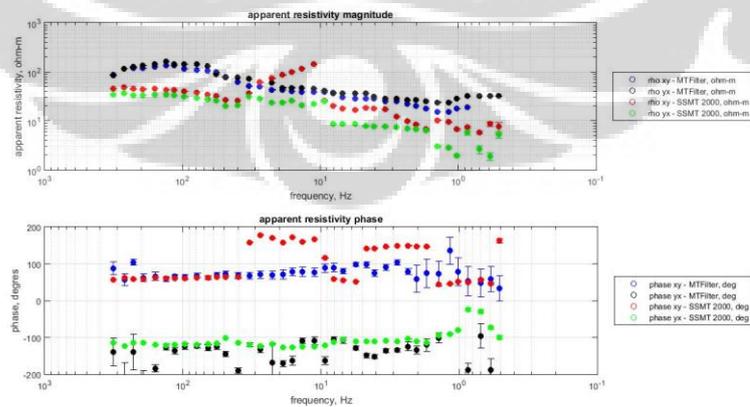
Gambar 4. 32. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 3 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan *Median Filter*



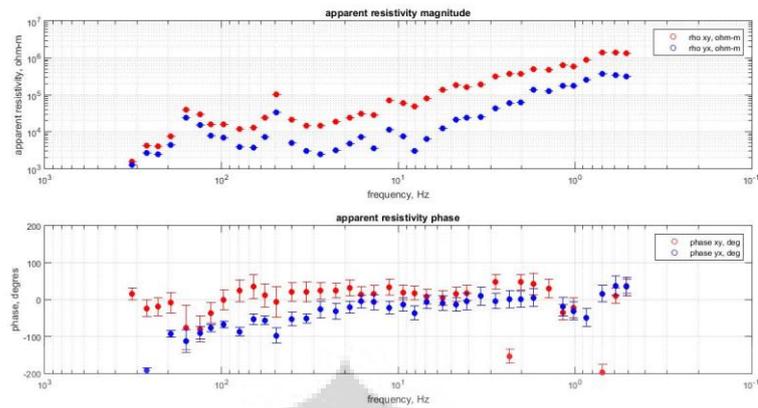
Gambar 4. 33. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 3 yang Diolah Menggunakan MTFiler dan SSMT 2000



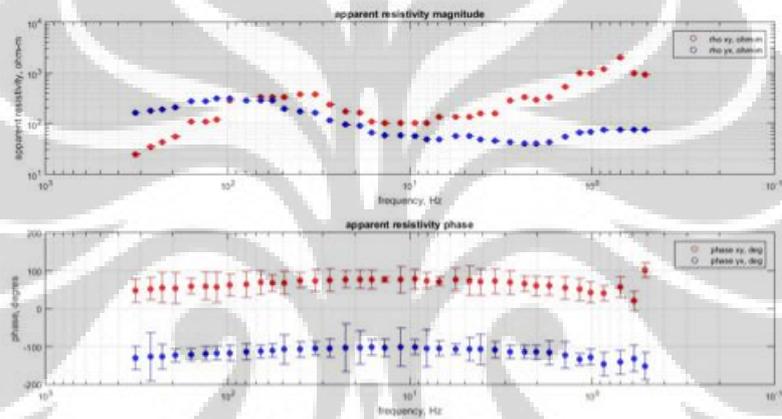
Gambar 4. 34. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 4 Sebelum dan Sesudah Difilerisasi dengan Menggunakan *Median Filter*



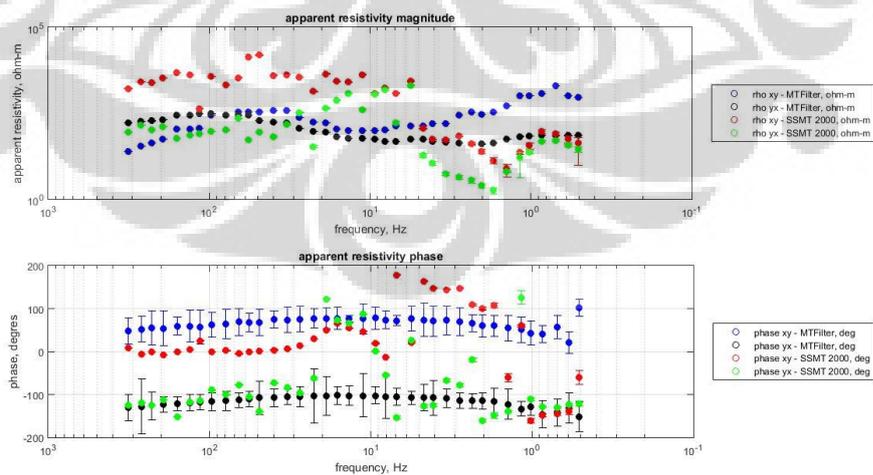
Gambar 4. 35. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 4 yang Diolah Menggunakan MTFiler dan SSMT 2000



Gambar 4. 36. Data Titik 5 Sebelum Dilakukan Seleksi Data *Time Series*



Gambar 4. 37. Data Titik 5 Setelah Dilakukan Seleksi Data *Time Series*

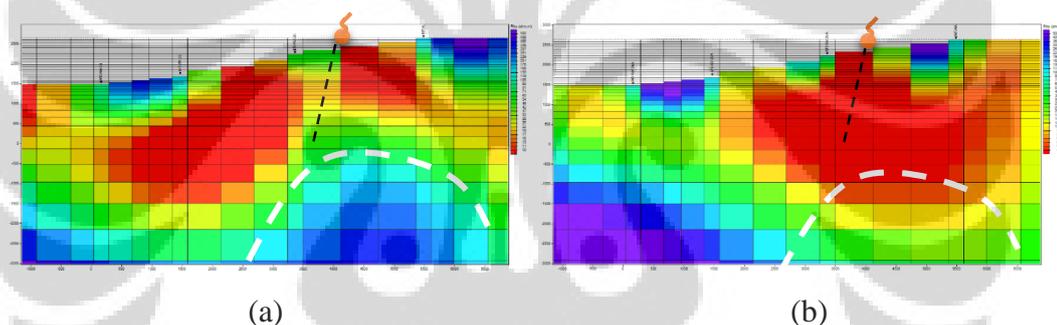


Gambar 4. 38. Komparasi Resistivitas Semu dan Fase Data Lapangan Pada Titik 5 yang Diolah Menggunakan MTFILTER dan SSMT 2000

Secara umum dapat dilihat bahwa pada data resistivitas semu dan fase *notch filter*, *median filter* dapat memberikan kualitas data yang lebih baik dibandingkan dengan data resistivitas semu dan fase yang belum difilterisasi atau diolah dengan menggunakan software komersil SSMT 2000. Seleksi data *time series* juga diketahui dapat memberikan hasil kurva resistivitas dan fase pada domain frekuensi yang lebih baik dan realistis.

4.3 Inversi dan Visualisasi

Inversi dua dimensi dilakukan untuk melihat sejauh mana filter dapat berperan dalam mencegah kesalahan interpretasi dan pemberian rekomendasi pemboran. Invers dua dimensi dilakukan menggunakan 4 titik data MT. Kedalaman pemodelan dan inversi dibatasi hingga – 3000 m. Hasil inversi dan pemodelan digambarkan pada berikut ini.



Gambar 4. 39. Hasil Inversi 2D dari Data yang Diolah Menggunakan (a) MTFilter (b) SSMT 2000

Dari gambar diatas terlihat bahwa hasil inversi yang menggunakan input dari data yang diolah menggunakan MTFilter memunculkan bentuk *up-dome shaped* yang merupakan ciri-ciri umum mengenai keberadaan sistem panas bumi dibawah permukaan bumi. *Updome-shaped* merupakan suatu struktur geologi yang muncul akibat adanya sumber panas di bawah permukaan bumi dan menimbulkan gradien temperatur yang radial pada zona di sekeliling sumber panas tersebut. Hal ini memperlihatkan bahwa filter yang telah dibuat memberikan kontribusi yang cukup signifikan dalam inversi dan pemodelan MT.

BAB 5 PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Pada penelitian ini keberadaan *harmonic powerline noise* dapat diidentifikasi menggunakan inspeksi visual dan analisa spektrum sedangkan *spike noise* dapat diidentifikasi menggunakan inspeksi visual.
- b. *Harmonic powerline noise* yang muncul pada data MT dapat difilterisasi dengan menggunakan *notch filter* yang bekerja dengan mengurangi anomali amplitudo gelombang yang tinggi pada frekuensi 50 Hz dan kelipatan ganjilnya.
- c. *Spike noise* yang muncul pada data MT dapat difilterisasi dengan menggunakan *median filter* dimana filter ini memiliki kualitas filterisasi yang lebih baik daripada *moving average filter* dalam parameter inspeksi visual dan autokorelasi.
- d. Seleksi data *time series* dapat dilakukan untuk mengeliminasi data MT yang terkontaminasi *noise* dengan membuat segmentasi data *time series* yang masing-masing berdurasi 2 detik. Pengolahan data dengan seleksi data *time series* dapat menghasilkan data resistivitas semu dan fase yang lebih baik.
- e. Komparasi hasil pengolahan data berupa kurva resistivitas semu dan fase serta inversi dua dimensi menunjukkan *output* yang dihasilkan oleh MTFilter lebih baik dibandingkan *software* komersil SSMT 2000.
- f. Piranti lunak yang dikembangkan penulis (MTFilter) dapat menjadi alternatif untuk mengeliminasi *noise* pada data MT terutama *harmonic powerline noise*, *spike noise*, atau *low quality data* yang sudah sifatnya diskrit pada selang waktu tertentu.

4.2 Saran

Setelah melakukan penelitian ini, saran dan rekomendasi yang dapat disampaikan diantaranya:

- a. Pengembangan filter *harmonic powerline noise* untuk data MT pada penelitian selanjutnya perlu mempertimbangan faktor fase karena pada penelitian ini fase impedansi masih belum menunjukkan hasil yang lebih baik.
- b. Untuk meningkatkan kualitas data MT pada tahap pengolahan data perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terhadap *noise* yang bersifat kontinu lainnya seperti pengaruh sinyal kotak, gelombang radio, dan lain sebagainya.



DAFTAR REFERENSI

- Chave, A. D., and Jones, A. G. (2012). *The Magnetotelluric: Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Daud, Y. (2014a). *Fundamental Concept of Magnetotelluric Technology*. Depok: Universitas Indonesia.
- Daud, Y. (2014b). *Geothermal System and Resources*. Depok: Universitas Indonesia.
- Daud, Y. (2015). *Role Geophysics in Geothermal Exploration and Monitoring*. Depok: Universitas Indonesia.
- Dewi, R. (2012). *Pemrosesan Data Magnetotellurik dengan Memperhitungkan Faktor Kalibrasi Menggunakan MATLAB*. Depok: Universitas Indonesia.
- Fahmi, F. (2013). *Pemodelan Sistem Geothermal Arjuno Welirang Dengan Menggunakan Data Magnetotellurik*. Depok: Universitas Indonesia.
- Fontes, S. L., Harinarayana, T., Dawes, G. J., and Hutton, V. R. (1988). Processing of Noisy Magnetotelluric Data Using Digital Filters and Additional Data Selection Criteria. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 30-40.
- Heditama, D. M. (2011). *Pemrosesan Data Time Series pada Magnetotellurik (MT) Menjadi Data Resistivitas Semu dan Fase Menggunakan MATLAB*. Depok: Universitas Indonesia.
- LDS Group - SPX Company. (2003). *Understanding FFT Windows*. London, United Kingdom.
- Manoj, C. (2003). *Magnetotelluric Data Analysis using Advances in Signal Processing Techniques*. Hyderabad: National Geophysical Research Institute.

- Panitia Pengembangan Bahasa Indonesia. (2000). *Pedoman Umum Ejaan Bahasa Indonesia yang Disempurnakan*. Jakarta: Pusat Bahasa Departemen Pendidikan Nasional.
- Simpson, F., and Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotellurics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sulistyo, A. (2011). *Koreksi Pergeseran Statik Data Magnetotellurik (MT) Menggunakan Metode Geostatistik, Perata-rataan, dan Time Domain Electromagnetic*. Depok: Universitas Indonesia.
- Szarka, L. (1988). Geophysical Aspects of Man-Made Electromagnetic Noise In The Earth - A Review. *Surveys in Geophysics*, 287-318.
- Tan, L. (2008). *Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications*. California: Elsevier.
- Universitas Indonesia. (2008). *Pedoman Teknis Penulisan Tugas Akhir Mahasiswa Universitas Indonesia*. Depok: Universitas Indonesia.