



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMROSESAN DATA MAGNETOTELLURIK DENGAN
MEMPERHITUNGGAN FAKTOR KALIBRASI
MENGUNAKAN MATLAB**

SKRIPSI

**RATNA DEWI
0806326304**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
KEKHUSUSAN GEOFISIKA
DEPOK
JUNI 2012**

Universitas Indonesia



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMROSESAN DATA MAGNETOTELLURIK DENGAN
MEMPERHITUNGGAN FAKTOR KALIBRASI
MENGUNAKAN MATLAB**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

**RATNA DEWI
0806326304**

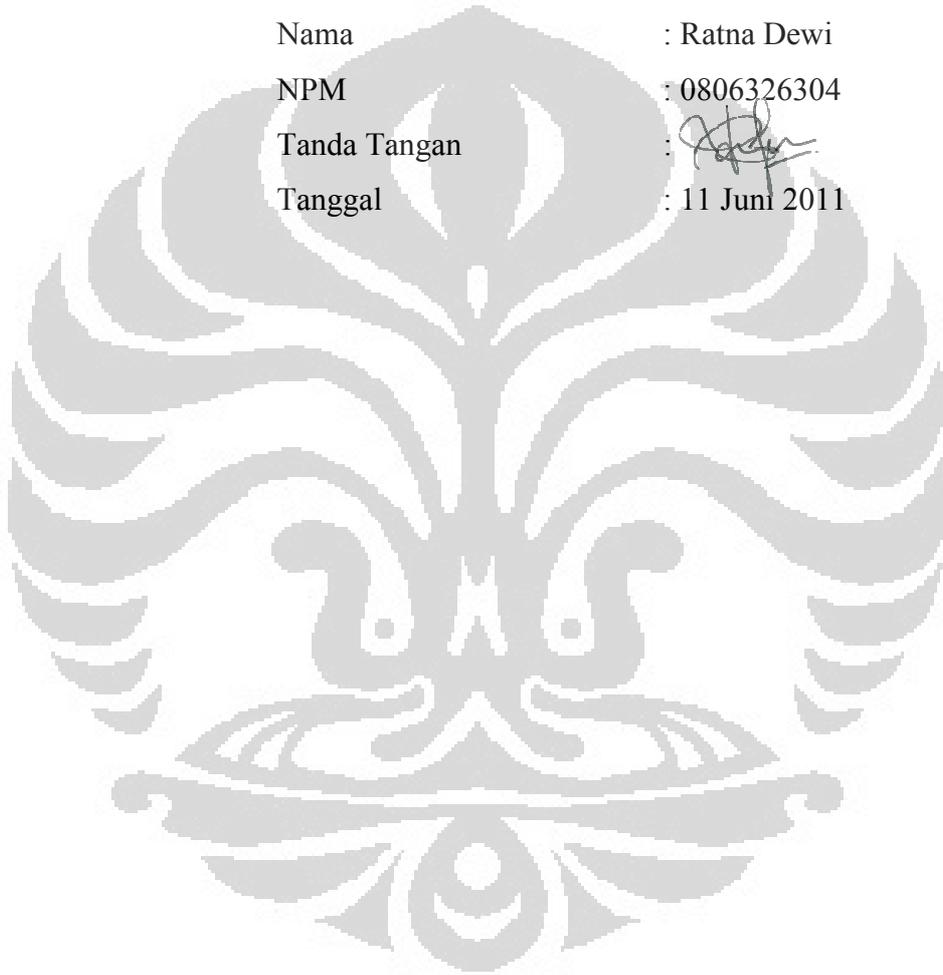
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
KEKHUSUSAN GEOFISIKA
DEPOK
JUNI 2012**

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ratna Dewi
NPM : 0806326304
Tanda Tangan : 
Tanggal : 11 Juni 2011



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Ratna Dewi
NPM : 0806326304
Program Studi : S-1 Reguler
Judul Skripsi : Pemrosesan Data Magnetotellurik dengan
Memperhitungkan Faktor Kalibrasi Menggunakan 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 : Dr. Rer. nat Abdul Haris

()

Penguji : Dr. Dede Djuhana

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 11 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

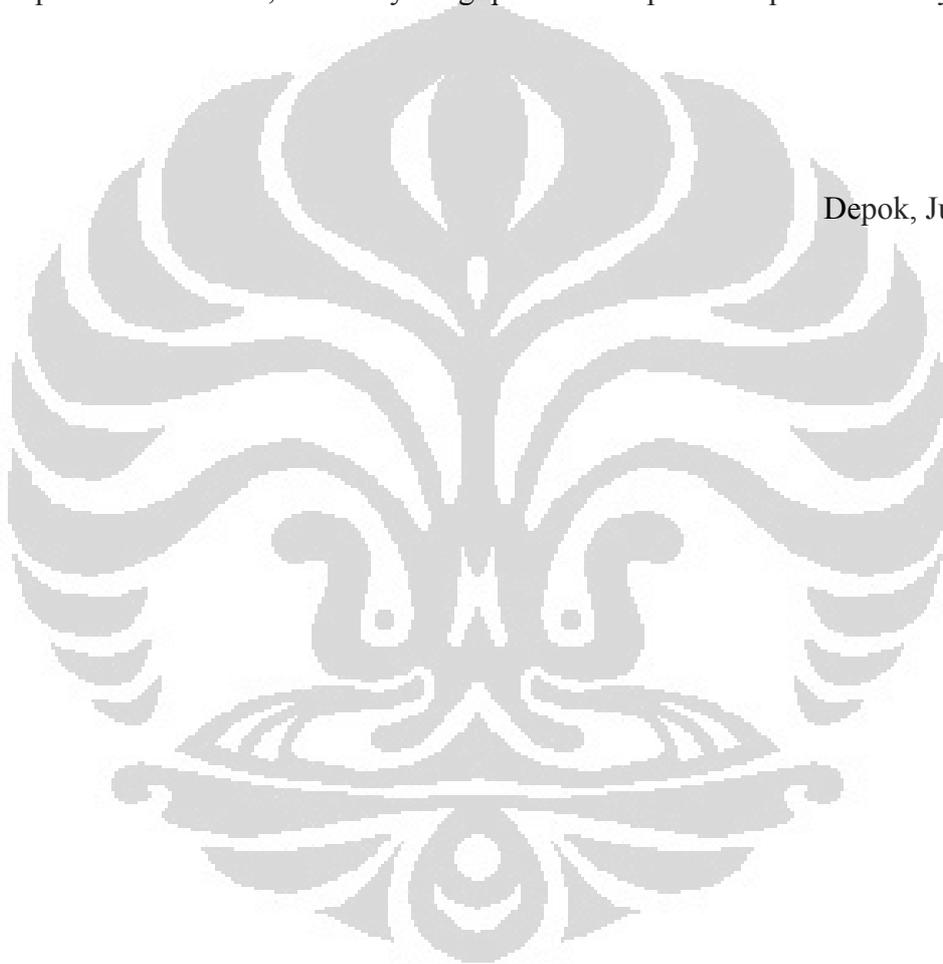
1. Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan banyak waktu untuk memberikan bimbingan, pengarahan, saran, serta semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Dr. rer. nat Abdul Haris dan Dr. Dede Djuhana, selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi serta saran terkait penulisan skripsi.
3. Seluruh dosen Departemen Fisika UI yang telah memberikan ilmu serta petuah kepada penulis.
4. Mas Iwan Sugihartono, yang telah memberikan waktunya untuk berdiskusi serta semangat dan petuahnya.
5. Kak Dzil Mulki Heditama, yang telah memberikan banyak waktunya untuk berdiskusi dan berkonsultasi terkait pembuatan program.
6. Bapak dan Ibu, yang selalu memberikan doa, semangat serta dukungan, dalam keadaan apapun, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi.
7. Qonita Amriyah, Cut Rulia, dan Sari Widyanti, Kak Delin selaku teman satu bimbingan atas semangat, saran, bantuan, dan waktu diskusinya.
8. Shafa Rahmi, atas buku saktinya yang telah dipinjamkan dan rela dicoret-corei.
9. Disa Riliana, Prillia Aufa, Harnanti Yoga Putri, Zulimatul, Siska Esthi, Kiky Reski, Febrina Yufrizal, Dio Fadli, Alim Nur, dan Rizky Ikhsan atas semua semangat dan dukungannya selama proses pengerjaan skripsi ini.

10. Seluruh teman-teman Fisika UI 2008, 2009, dan 2007 yang telah memberikan semangat dan dukungannya.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan yang disebabkan karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun sebagai pelajaran pada masa yang akan datang. Selain itu, penulis juga berharap semoga skripsi ini bermanfaat, khususnya bagi penulis dan pembaca pada umumnya.

Depok, Juni 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Ratna Dewi
NPM : 0806326304
Program Studi : S-1 Reguler
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

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

Pemrosesan Data Magnetotellurik dengan Memperhitungkan Faktor Kalibrasi Menggunakan MATLAB

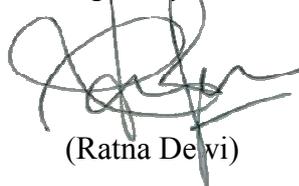
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 11 Juni 2012

Yang menyatakan



(Ratna Dewi)

ABSTRAK

Nama : Ratna Dewi
Program Studi : Fisika
Judul : Pemrosesan Data Magnetotellurik dengan Memperhitungkan
Faktor Kalibrasi Menggunakan MATLAB

Pengembangan teknologi magnetotellurik (MT) mutlak diperlukan dalam rangka menyelamatkan ‘*million dollar decision*’ dalam rangka eksplorasi panasbumi. Namun, *software* pengolahan data MT kebanyakan masih merupakan buatan luar negeri. Dalam rangka pengembangan teknologi MT di Indonesia, penulis berupaya mengembangkan *software* pengolahan data MT berbasis MATLAB yang telah dibuat oleh peneliti sebelumnya, yaitu Dzil Mulki Heditama. *Software* ini dimodifikasi dengan menambahkan proses perhitungan kalibrasi. Proses kalibrasi sendiri dilakukan karena adanya proses pengubahan sinyal berupa gelombang elektromagnet menjadi angka-angka integer dalam proses perekaman data. Proses kalibrasi dilakukan dalam 4 tahap, yaitu perhitungan *frequency-dependent calibration*, *frequency-independent calibration*, *analog to digital converter calibration*, dan yang terakhir dengan mengalikan ketiga kalibrasi tersebut dengan nilai medan magnet dan medan listrik terekam. Pengolahan data dengan menggunakan *software* ini pun dilakukan untuk melihat hasilnya. Untuk melihat tingkat kebenaran hasil pengolahan data dengan menggunakan *software* ini dilakukan pula pengolahan data dengan SSMT2000 dan membandingkan hasil inversi keduanya. Perbandingan hasil keduanya memperlihatkan bahwa terdapat kesesuaian antara keduanya, dan hasil pengolahan dari *software* ini kualitas datanya lebih bagus

Kata Kunci : magnetotellurik, kalibrasi, *time series*, impedansi, resistivitas semu, fase
xii+65 halaman : 58 gambar
Daftar Pustaka : 16(2002-2012)

ABSTRACT

Name : Ratna Dewi
Program Study : Physics
Title : Magnetotelluric Data Processing by Calculating
Calibration Factors Using MATLAB

Development of Magnetotelluric (MT) technology is absolutely needed in case of saving the 'million dollar decision' in geothermal exploration. But, software to process MT data are mostly made by other countries. In case of development of MT technology in Indonesia, writer try to develop MT data processing software using MATLAB which has made before by Dzil Mulki Heditama. This software is modified by adding calibration calculation process. Calibration process is used because the signal received, in form of electromagnetic waves, is changed to integer numbers form in storing process. Calibration process include 4 steps, calculation of frequency-dependent calibration, frequency-independent calibration, analog to digital converter calibration, and the last is multiplying all calibration with magnetic and electric field recorded. Data processing using this software is done to know the result. Accuracy is seen by comparing with the result of processing using SSMT2000 and comparing the result of inversion for both processings. The comparing result shows that there is similarity between two of them, and the quality of the result of data processing using this software is better.

Keyword : magnetotelluric, calibration, time series, impedance,
apparent resistivity, phase
xii+65 pages : 58 pictures
Bibliography : 16 (2002-2012)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LatarBelakang	1
1.2 TujuanPenelitian.....	3
1.3 BatasanMasalah.....	4
1.4 MetodePenelitian.....	4
1.5 SistematikaPenulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Prinsip Dasar Metode Magnetotellurik	7
2.2 Persamaan Maxwell	8
2.3 Akuisisi MT.....	9
2.4 PrinsipDasarPengolahan Data MT	11
2.5 PrinsipDasarKalibrasi Data MT	15
BAB 3 PEMBUATAN PROGRAM DAN PENGOLAHAN DATA	18
3.1Pembuatan Program dengan MATLAB	18
3.1.1 Data <i>Time Series</i>	19
3.1.2 Proses FFT.....	19

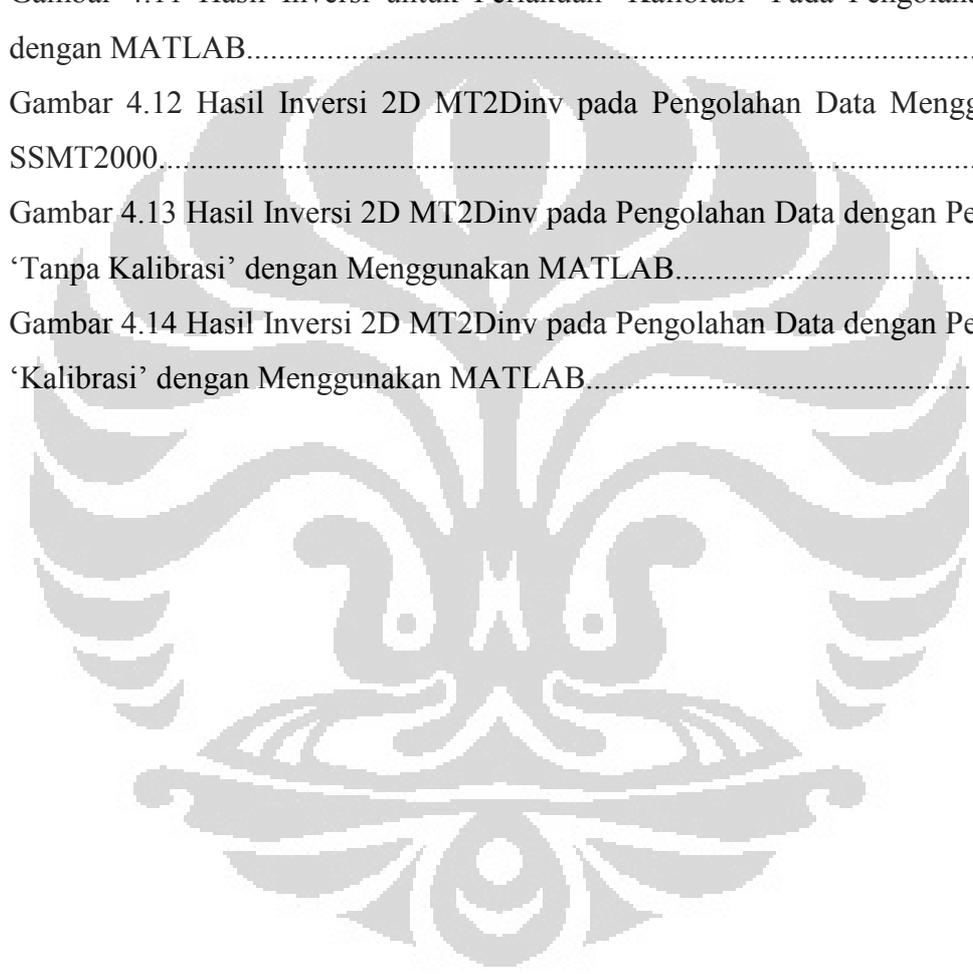
3.1.3 Perhitungan Kalibrasi	21
3.1.4 Perhitungan Impedansi, Resistivitas Semu dan Fase	24
3.1.5 Estimasi Robust	24
3.2 Penggabungan <i>Graphical User Interface</i> (GUI) dengan <i>Source Code</i> Pada MATLAB	25
3.3 Pengolahan Data Menggunakan MTPower	26
3.4 Inversi 2D Menggunakan WinGLink	33
3.5 Inversi 2D Menggunakan MT2Dinv	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Hasil Pengolahan Data dengan Menggunakan MT Power	41
4.2 Hasil Inversi 2D dengan Menggunakan WinGLink	56
4.3 Hasil Inversi 2D dengan Menggunakan MT2Dinv	59
BAB 5 PENUTUP	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran	63
DAFTAR ACUAN	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Persebaran Potensi Panasbumi di Indonesia	1
Gambar 1.2 Konfigurasi Alat MT.....	2
Gambar 1.3 Skematik Alur Penelitian.....	5
Gambar 2.1 Prinsip Dasar Metode MT.....	7
Gambar 2.2 Ilustrasi Mode Pengukuran MT, TE dan TM.....	9
Gambar 2.3 Layout Pengukuran MT di Lapangan.....	10
Gambar 2.4 Bentuk Sinyal Data Time Series MT.....	11
Gambar 2.5 Ilustrasi Perhitungan Teknik Robust.....	13
Gambar 2.6 Kurva Sensitivitas Sensor Magnetik (Koil Induksi dan <i>fluxgate magnetometer</i>) terhadap periode.....	16
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengolahan Data <i>Time Series</i> di MATLAB.....	18
Gambar 3.2 Bentuk Data dalam Domain (a) Waktu dan (b) Frekuensi	20
Gambar 3.3 Proses Penghilangan Tren Linier.....	20
Gambar 3.4 Proses <i>Hanning Window</i>	21
Gambar 3.5 Contoh Data Kalibrasi Boks dari Alat MT.....	22
Gambar 3.6 Contoh Data Kalibrasi Sensor dari Koil Induksi.....	23
Gambar 3.7 Perbandingan <i>Teknik Robust</i> dan <i>Least Square</i>	25
Gambar 3.8 Tampilan GUI	25
Gambar 3.9 Kotak Dialog ‘Pilih Time Series’.....	27
Gambar 3.10 Kotak Dialog ‘Sedang Membaca Data’.....	27
Gambar 3.11 Kotak Dialog ‘Alhamdulillah Berhasil’.....	27
Gambar 3.12 Tampilan Sinyal <i>Time Series</i> data MT.....	28
Gambar 3.13 Kotak Dialog ‘Masukkan Data TS’.....	28
Gambar 3.14 Kotak Dialog ‘KalBOX’.....	29
Gambar 3.15 Kotak Dialog ‘KalSensor’.....	29
Gambar 3.16 Kotak Dialog ‘Segmen’.....	29
Gambar 3.17 Kotak Dialog ‘Silakan Tunggu’.....	30
Gambar 3.18 Kotak Dialog ‘Simpan Hasil Spektra’.....	30
Gambar 3.19 Kotak Dialog ‘Simpan Rho & Phase’.....	30

Gambar 3.20 Tampilan Kurva Spektra.....	31
Gambar 3.21 Tampilan Kurva resistivitas Semu dan Fase vs Frekuensi.....	31
Gambar 3.22 Kotak Dialog ‘Pilih Rho & Phase MTPower’.....	32
Gambar 3.23 Kotak Dialog ‘Pilih Rho & Phase Phoenix’.....	32
Gambar 3.24 Tampilan Hasil Perbandingan Hasil Pengolahan Menggunakan MATLAB dan SSMT.....	33
Gambar 3.25 Kotak Dialog ‘Kesalahan Referensi’.....	33
Gambar 3.26 Tampilan Awal WinGLink.....	34
Gambar 3.27 Kotak Dialog ‘Database’.....	34
Gambar 3.28 Kotak Dialog ‘New WinGLink Database’.....	35
Gambar 3.29 Kotak Dialog ‘DatabaseProperties’.....	35
Gambar 3.30 Kotak Dialog ‘Metric Coords’.....	36
Gambar 3.31 Tampilan Menu Project	37
Gambar 3.32 Tampilan Menu File→Import.....	37
Gambar 3.33 Tampilan Awal MT2Dinv.....	38
Gambar 3.34 Tampilan Ikon buka dan Impor File.....	39
Gambar 3.35 Tampilan Ikon Inversi.....	39
Gambar 3.36 Tampilan Pengaturan Parameter dan Proses Inversi.....	40
Gambar 4.1 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 001 (a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	42
Gambar 4.2 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 002 (a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	44
Gambar 4.3 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 003 (a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	46
Gambar 4.4 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 004 (a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	48
Gambar 4.5 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 005 (a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	50
Gambar 4.6 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 006(a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	52

Gambar 4.7 Kurva Resistivitas dan Fase vs Frekuensi untuk Titik 007 (a) Sebelum Dikalibrasi, dan (b) Setelah Dikalibrasi.....	54
Gambar 4.8 Lintasan Inversi.....	56
Gambar 4.9 Hasil Inversi untuk Hasil Pengolahan Data dengan Menggunakan SSMT.....	56
Gambar 4.10 Hasil Inversi untuk Perlakuan ‘Tanpa Kalibrasi’ Pada Pengolahan Data dengan MATLAB.....	57
Gambar 4.11 Hasil Inversi untuk Perlakuan ‘Kalibrasi’ Pada Pengolahan Data dengan MATLAB.....	58
Gambar 4.12 Hasil Inversi 2D MT2Dinv pada Pengolahan Data Menggunakan SSMT2000.....	59
Gambar 4.13 Hasil Inversi 2D MT2Dinv pada Pengolahan Data dengan Perlakuan ‘Tanpa Kalibrasi’ dengan Menggunakan MATLAB.....	60
Gambar 4.14 Hasil Inversi 2D MT2Dinv pada Pengolahan Data dengan Perlakuan ‘Kalibrasi’ dengan Menggunakan MATLAB.....	61



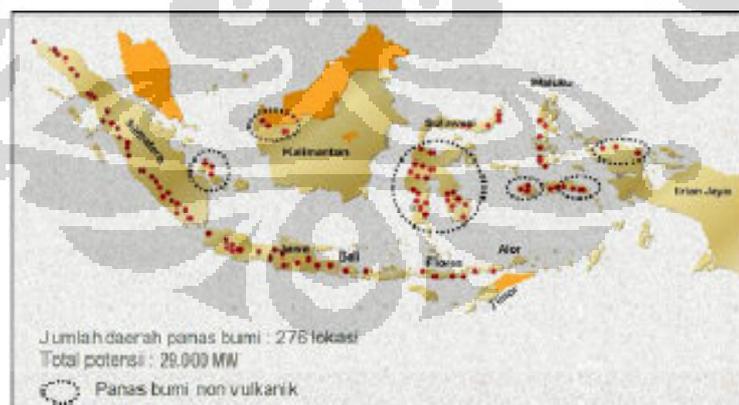
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dunia yang pesat, industrialisasi dan peningkatan gaya hidup, kebutuhan akan energi juga turut meningkat. Disebutkan dalam *International Energy Outlook* pada tahun 2005, 63% konsumsi energi total dunia dipenuhi oleh minyak dan gas alam (Gupta and Roy, 2007). Sedangkan minyak sendiri bukan merupakan sumber daya yang dapat diperbarui dan cadangannya makin lama semakin menipis. Oleh karena itu, diperlukan adanya suatu sumber energi primer yang dapat diproduksi dalam jumlah besar yang dapat menggantikan kebutuhan akan minyak. Salah satu sumber energi primer tersebut adalah panasbumi.

Indonesia sendiri terletak dalam jalur *ring of fire* sehingga merupakan daerah yang mempunyai potensi panas bumi (Fro, 2011). Potensi panasbumi di Indonesia mencapai 28.000 MW (Darma, 2011). Jumlah ini mencakup 40% dari cadangan dunia. Persebaran potensi panasbumi di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1.1.



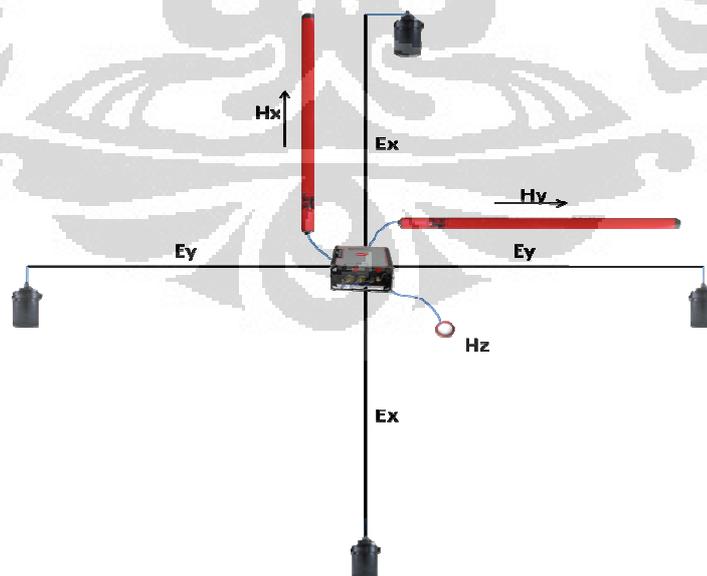
Gambar 1.1. Persebaran Potensi Panasbumi di Indonesia (Sukhyar, 2011)

Dalam rangka memaksimalkan potensi panasbumi diperlukan adanya pengembangan teknologi eksplorasi panasbumi. Eksplorasi panasbumi bukan merupakan hal yang murah. Untuk mengebor satu sumur panasbumi saja diperlukan biaya sebesar jutaan dolar. Jika teknologi yang digunakan tidak tepat

dan tidak dapat memetakan kondisi bawah tanah secara akurat, maka dapat dipastikan uang sebesar itu akan hangus begitu saja. Itulah mengapa eksplorasi panasbumi ini disebut dengan *'million dollars decision'* sehingga pengembangan teknologi eksplorasi panasbumi mutlak harus dilakukan.

Salah satu metode yang paling cocok digunakan dalam eksplorasi panasbumi adalah metode magnetotellurik (MT). Metode ini memanfaatkan gelombang elektromagnet dengan rentang frekuensi yang luas yang menjalar secara alami di permukaan bumi untuk menggambarkan struktur resistivitas bawah tanah. Sumbernya berasal dari petir atau interaksi antara *solar wind* dengan lapisan magnetosfer bumi. Lebarnya rentang frekuensi yang digunakan mengartikan bahwa metode ini dapat mengatasi masalah lapisan *overburden* yang konduktif dan mempunyai penetrasi yang dalam. Metode ini mengukur medan listrik dan medan magnet pada dua arah yang saling tegak lurus sehingga dapat memberikan informasi penting terkait *electrical anisotropy* di wilayah tertentu (Daud, et al., 2010). Karakteristik inilah yang menjadikan metode MT lebih efektif dan *powerful* untuk digunakan pada eksplorasi panasbumi.

Pada akuisisi MT, data yang kita dapatkan berupa komponen medan listrik (E_x dan E_y) serta komponen medan magnet (H_x , H_y , dan H_z). Data ini direkam menggunakan alat dengan konfigurasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Konfigurasi alat MT (Daud, 2012)

Dalam perekaman data, sinyal gelombang elektromagnet disimpan dalam bentuk angka-angka integer. Oleh karena itu, harus ada hubungan antara keluaran sensor dengan angka-angka yang disimpan pada sistem akuisisi data. Hubungan inilah yang dinamakan kalibrasi (Simpson dan Bahr, 2005). Dalam setiap akuisisi MT, alat dan sensor MT harus dikalibrasi sebelum melakukan akuisisi dan harus direkalibrasi lagi pada akhir akuisisi. Pada proses kalibrasi, kita mengukur sinyal dengan input yang sudah diketahui dengan menggunakan alat MT. Hasil dari pengukuran ini disimpan dalam file yang terpisah antara kalibrasi dari alat dan kalibrasi dari sensornya. Dari hasil kalibrasi ini, kita dapat mengetahui apakah alat MT berjalan dengan baik dan apakah kita telah memilih alat dengan karakteristik yang sesuai dengan kondisi daerah pengukuran.

Pada proses pengolahan data, proses kalibrasi ini menjadi penting karena diperlukan untuk menyesuaikan data yang terekam pada sensor dengan kondisi yang sebenarnya pada saat akuisisi. Namun, pada penelitian sebelumnya, yang dilakukan oleh Dzil Mulki Heditama dengan judul “Pemrosesan Data *Time Series* Pada Metode Magnetotellurik (MT) Menjadi Data Resistivitas Semu dan Fase Menggunakan MATLAB”, proses kalibrasi tidak dilakukan. Kemungkinan hal inilah yang membuat adanya sedikit perbedaan antara hasil yang diperoleh dari pemrosesan dengan MATLAB dan pemrosesan dengan SSMT2000 (Heditama, 2011). Oleh karena pentingnya kalibrasi ini, maka penulis akan memasukkan perhitungan kalibrasi pada *software* pengolahan data MT berbasis MATLAB, yang telah dibuat oleh peneliti sebelumnya.

1.2 Tujuan Penelitian

Pelaksanaan Tugas Akhir ini didasari oleh beberapa tujuan yang diantaranya adalah:

1. Memahami langkah – langkah pengolahan data metode Magnetotellurik (MT).
2. Memahami proses kalibrasi pada pengolahan data metode Magnetotellurik (MT).
3. Melakukan perhitungan proses kalibrasi dengan menggunakan program berbasis MATLAB.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis memfokuskan pada pembuatan program menggunakan MATLAB yang digunakan untuk melakukan perhitungan kalibrasi data MT yang diperoleh saat akuisisi data yang masih berupa *time series* hingga dapat diolah menjadi berupa data resistivitas semu dan fase.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan terdiri atas beberapa tahap, antara lain:

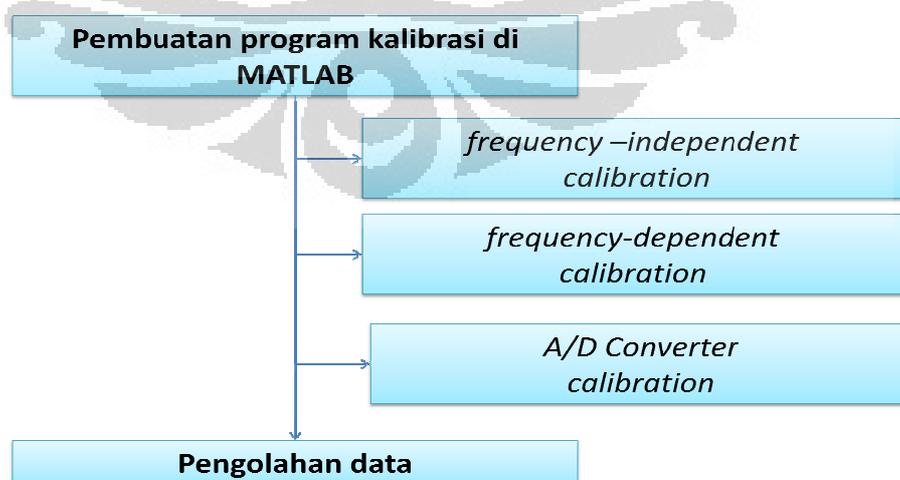
a. Studi Kepustakaan

Pada tahap ini penulis mempelajari dan memahami konsep mengenai metode magnetotellurik (MT) secara umum dan proses kalibrasi secara lebih khusus, baik itu proses akuisisi lapangannya maupun proses pengolahan datanya. Informasi mengenai hal tersebut diperoleh dari berbagai sumber, baik buku, paper, internet, penjelasan dari dosen pembimbing, maupun diskusi dengan mahasiswa lainnya.

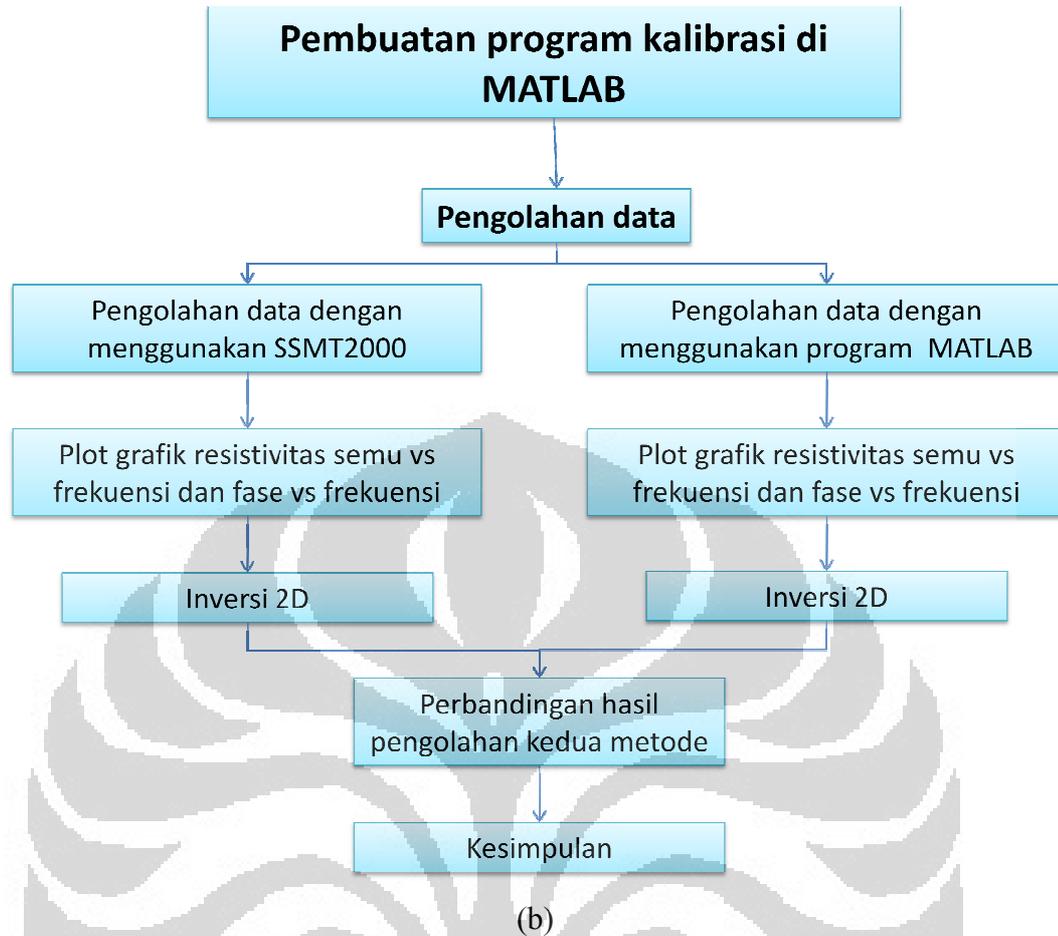
b. Pembuatan Program dan Pengolahan Data

Pada tahap ini, penulis melakukan pembuatan program pengkalibrasi data magnetotellurik dengan menggunakan MATLAB sesuai dengan teori yang didapatkan pada tahap studi pustaka. Untuk menguji program, maka pada tahap ini dilakukan pengolahan data dari data mentah yang berupa *time series* hingga didapatkan nilai resistivitas semu dan fase.

Berikut adalah skematik alur penelitian secara keseluruhan yang dilakukan:



(a)



Gambar 1.3. Skematik Alur Penelitian (a) Pembuatan program kalibrasi, (b) Pengolahan data.

Skematik alur penelitian pada Gambar 1.3 merupakan alur yang dilakukan penulis dalam melakukan penelitian ini. Penulis membuat sendiri *source code* program perhitungan kalibrasi dengan menggunakan MATLAB yang mengacu pada teori yang didapatkan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini dibagi menjadi 5 bab, yang masing-masing terdiri atas beberapa sub-bab. Penulisan bab-bab tersebut dilakukan sebagai berikut :

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan secara umum dari latar belakang masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang uraian dari teori dasar yang digunakan pada penelitian ini.

BAB 3. PEMBUATAN PROGRAM DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini berisi tentang tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian, yaitu tahapan-tahapan pembuatan program dengan MATLAB dan tahapan pengolahan data dari data awal yang berupa *time series* hingga menjadi data *frequency domain* yang berupa resistivitas semu dan fase, yang sebelumnya telah mengalami proses kalibrasi.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi mengenai penjelasan dan analisis dari hasil yang didapatkan dari proses pengolahan data.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dibahas dan dianalisis pada bab sebelumnya, serta berisis saran-saran yang diharapkan dapat berguna untuk pengembangan penelitian yang lebih lanjut.

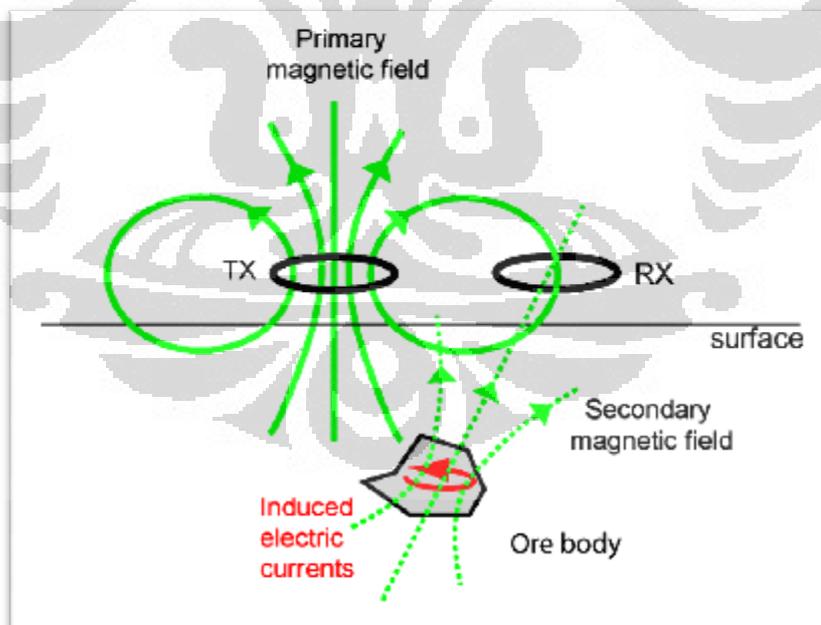
BAB 2

TEORI DASAR

2.1 Prinsip Dasar Metode Magnetotelluric

Metode magnetotellurik merupakan metode elektromagnetik (EM) pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) alami pada arah yang ortogonal dengan arah permukaan bumi dengan tujuan untuk menentukan konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman puluhan meter hingga ribuan meter (Simpson dan Bahr, 2005).

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam eksplorasi geotermal karena kemampuannya untuk mendeteksi kondisi bawah tanah yang dalam. Kedalaman penetrasi metode ini dikarenakan metode ini mengukur gelombang elektromagnet dengan frekuensi yang rendah, yaitu sekitar 300-0.001 Hz. Selain itu, metode ini mampu untuk memetakan struktur dan mendeteksi batas antara *clay cap* yang konduktif dengan reservoir yang resistif.



Gambar 2.1 Prinsip Dasar Metode MT (Unsworth, 2006)

Gambar 2.1 di atas menggambarkan prinsip dasar metode magnetotellurik. Proses penjalaran gelombang elektromagnetik dapat dijelaskan sebagai berikut (Unsworth, 2006):

- a. Terdapat medan elektromagnet primer di bumi, yang dapat berupa medan elektromagnet alami maupun buatan. Geometri dari medan elektromagnet ini dapat berupa gelombang bidang ataupun gelombang yang dihasilkan oleh dipol transmiter (TX). Variasi terhadap waktunya dapat berupa frekuensi tunggal yang harmonis atau pulsa gelombang.
- b. Medan elektromagnet primer menghasilkan medan elektromagnet sekunder di bumi (terjadi arus eddy akibat induksi, amplitudo dan fase dari gelombang berubah). Pada kasus ini, bumi dapat diasumsikan sebagai konduktor, sedangkan udara sebagai resistor. Medan elektromagnet total yang terukur di *receiver* (RX) adalah jumlah dari medan elektromagnet primer dan sekunder.
- c. Pengukuran di permukaan bumi (atau lubang bor) dari medan magnet dan medan listrik dilakukan dengan menempatkan *receiver* RX pada titik pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan fungsi waktu.

2.2 Persamaan Maxwell

Sifat dan penjalaran gelombang elektromagnetik ke bawah permukaan bumi memenuhi persamaan Maxwell dalam kaitannya dengan medan magnet dan medan listrik. Persamaan tersebut dirumuskan sebagai berikut:

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

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Hukum Coulomb}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \eta_f \quad (\text{Hukum Kontinuitas Fluks Magnetik}) \quad (2.4)$$

dimana \mathbf{E} adalah medan listrik (V/m), \mathbf{B} adalah induksi magnetik (T), \mathbf{H} adalah intensitas magnet (A/m), \mathbf{D} adalah *displacement* listrik (C/m²), \mathbf{j}_f adalah densitas arus listrik (A/m²), η_f adalah densitas muatan listrik (C/m³).

Pada persamaan (2.1), Hukum Faraday disini menjelaskan bahwa perubahan induksi medan magnetik terhadap waktu akan menyebabkan timbulnya

fluktuasi medan listrik. Hukum Ampere pada persamaan (2.2) menjelaskan bahwa adanya sumber arus listrik dan perubahan medan listrik terhadap waktu akan menyebabkan terbentuknya medan magnetik. Hukum Kontinuitas pada persamaan (2.3) menyatakan bahwa tidak ada medan magnetik yang bersifat monopol. Pada persamaan (2.4), Hukum Coulomb disini menjelaskan bahwa adanya muatan listrik akan menimbulkan medan listrik (Telford, et al., 2004).

2.3 Akuisisi MT

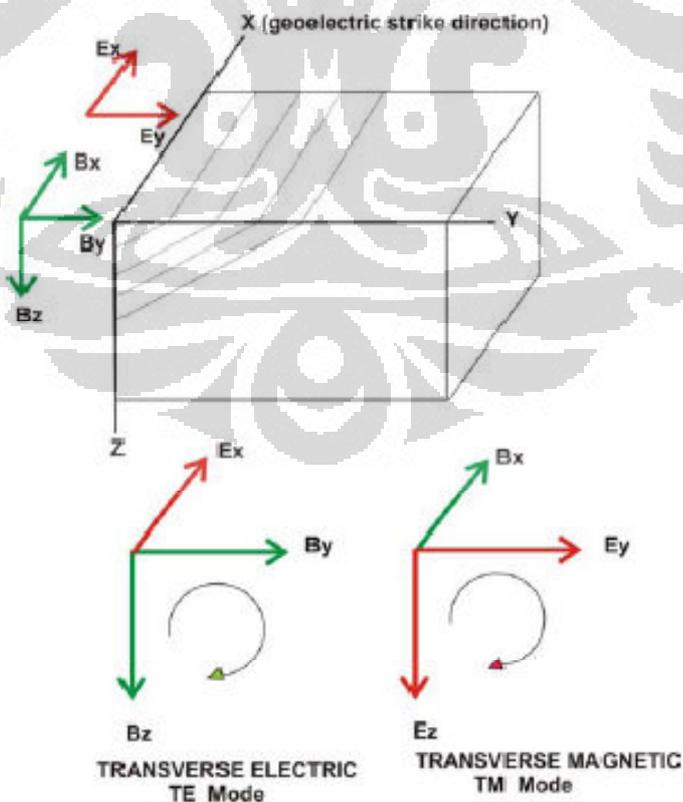
Akuisisi MT di lapangan sendiri terbagi menjadi 2 mode (Unsworth, 2006), yaitu :

1. *Transverse Magnetic Mode (TM)*

Mode ini mengukur medan magnet yang searah dengan struktur geologi dan medan listrik yang tegak lurus dengan arah struktur.

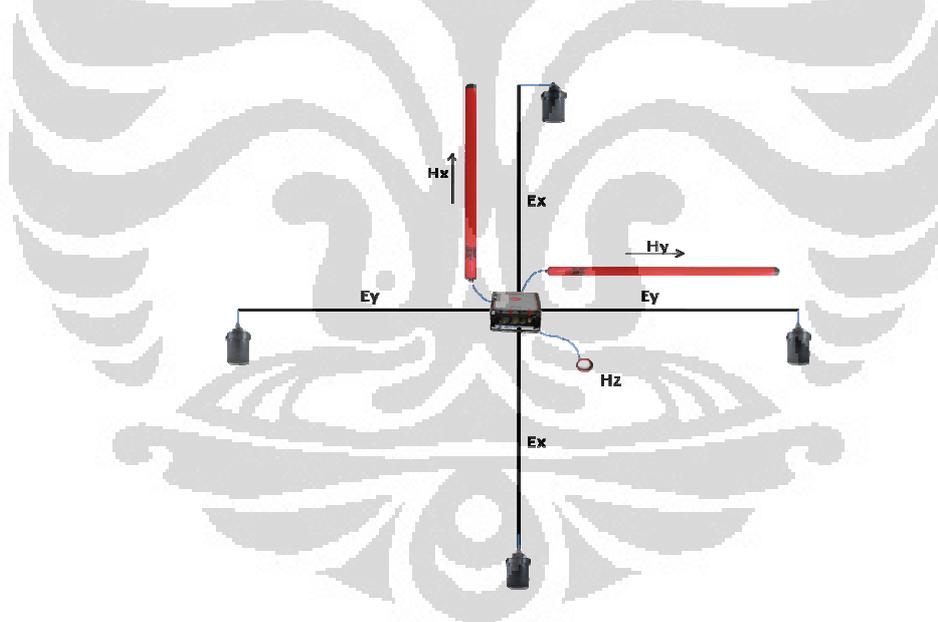
2. *Transverse Electric Mode (TE)*

Mode ini mengukur medan magnet yang tegak lurus dengan struktur (struktur geologi) dan medan listrik yang searah dengan arah struktur.



Gambar 2.2 Ilustrasi mode pengukuran MT, TE dan TM (Daud, 2012)

Dalam akuisisi data MT, yang diukur adalah medan listrik dan medan magnetnya. Dalam Unsworth (2006) dijelaskan bahwa medan listrik diukur dengan menggunakan dipol sejauh ± 100 m dengan elektroda yang tidak berpolarisasi di kedua ujungnya. Alat ini mengukur beda potensial antara kedua elektrodanya. Biasanya, pengukuran medan listrik menggunakan dua buah dipole, satu mengarah ke utara-selatan, satu lagi mengarah ke timur-barat. Sedangkan medan magnet diukur dengan menggunakan koil induksi (untuk frekuensi tinggi) atau menggunakan *fluxgate magnetometer* (untuk frekuensi rendah) yang berjumlah 3 buah (H_x , H_y , dan H_z). Perubahan medan magnet akan menghasilkan respon pada koil maupun magnetometer yang digunakan. Koil induksi hanya dapat mengukur medan magnet relatif, sedangkan *fluxgate magnetometer* dapat mengukur medan magnet absolut.



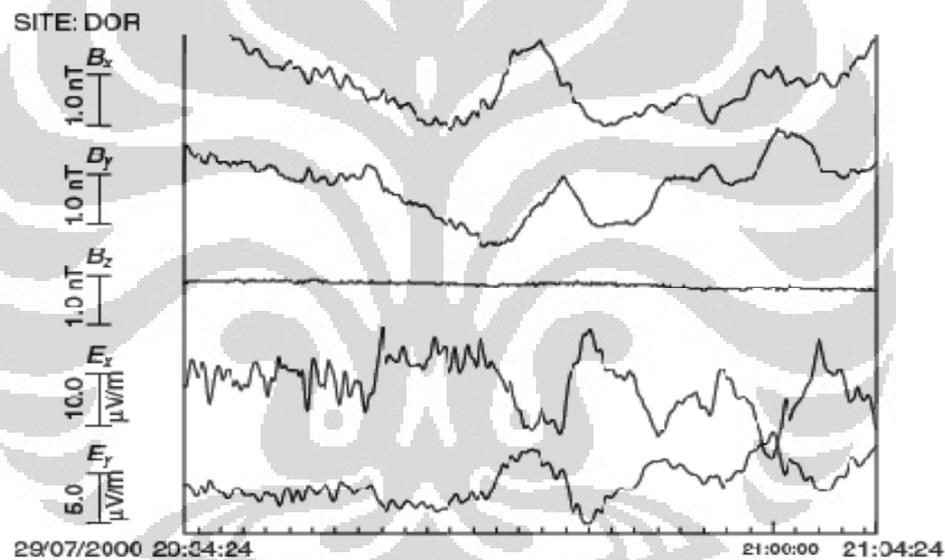
Gambar 2.3 Layout pengukuran MT di lapangan (Daud,2012)

Pengukuran MT dilakukan selama kurang lebih 14 jam. Hal ini dilakukan karena metode ini mengukur gelombang elektromagnet dengan frekuensi sangat rendah, yang berarti periodenya sangat besar. Pengukuran biasanya dilakukan dari waktu sore hari-pagi hari. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya fluktuasi

gelombang elektromagnet yang sangat besar yang disebabkan oleh aktivitas matahari.

2.4 Prinsip Dasar Pengolahan Data MT

Pengolahan data MT dilakukan dari data mentah berupa *time series* sampai diperoleh nilai resistivitas semu dan fase. *Digital time series* yang dikumpulkan selama survey MT, totalnya mencapai beberapa Gigabytes. Namun, data yang akan diinterpretasi dengan menggunakan skematik model numerik terdiri dari beberapa ratus data per stasiun yang merepresentasikan frekuensi yang bergantung pada fungsi transfer.



Gambar 2.4. Bentuk sinyal data *time series* MT (Simpson & Bahr, 2005)

Gambar 2.4 merupakan contoh data MT berupa *time series*. Diketahui bahwa *sampling rate* $\Delta t = 2 \text{ s}$ dan *time window*-nya 30 menit. Dengan demikian ada 900 *data point* yang diplot untuk masing-masing komponen. Pada Gambar tersebut terlihat ada lima komponen dan datanya sebesar 16 bit (2 byte), *time window* 30 menit tersebut merepresentasikan 9 KB data. *Time series* elektromagnetik direkam sampai beberapa minggu atau bulan, yang menghasilkan 10 MB data. Di sisi lain, *transfer functions* dari satu stasiun memiliki *dataset* yang sangat kecil yang digambarkan dengan tensor impedansi kompleks pada 30-50 *evaluation frequencies* (Simpson dan Bahr, 2005).

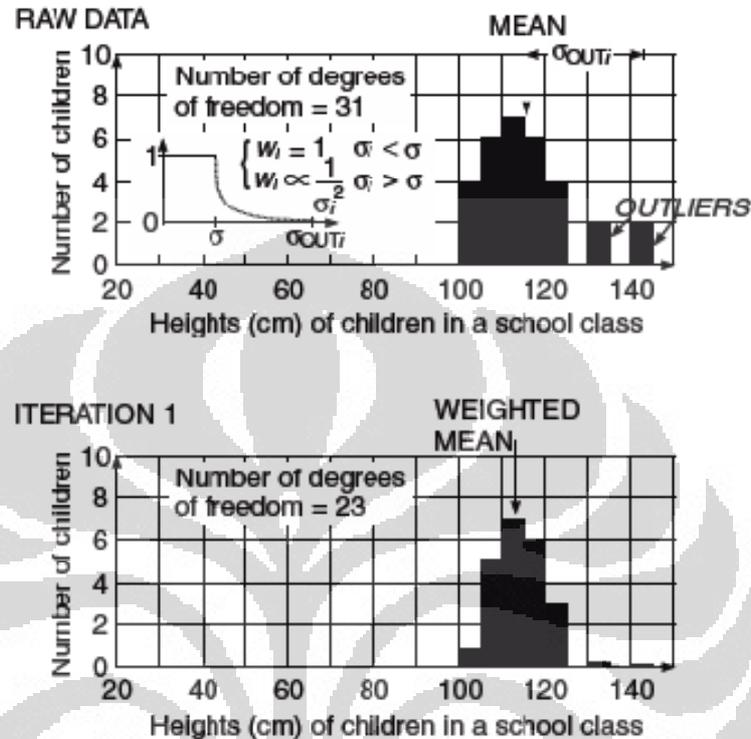
Langkah awal yang dilakukan dalam pengolahan data tersebut adalah mengubah domain data *time series* dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Hal tersebut dilakukan dengan menggunakan transformasi Fourier. Secara prinsip, transformasi Fourier adalah suatu operasi matematis yang mengubah sinyal menjadi spektrum (Munadi, 2002). Proses transformasi ke dalam domain frekuensi ini dilakukan karena parameter fisis seperti impedansi, resistivitas semu, dan fase merupakan fungsi frekuensi. Proses transformasi Fourier ini meliputi beberapa proses lainnya, seperti proses *trend removal*, proses *cosines bell*, dan transformasi Fourier diskrit. Proses ini akan menghasilkan garis-garis spektral yang diskrit pada spektra mentah dari kelima komponen terukur (H_x , H_y , H_z , E_x , dan E_y) (Simpson dan Bahr, 2005). Setelah kita mendapatkan spektra dari masing-masing komponen terukur, selanjutnya dilakukan kalibrasi agar data yang akan diolah selanjutnya bebas dari pengaruh alat.

Langkah selanjutnya merupakan pemilihan frekuensi atau periode. Proses pemilihan frekuensi ini sebenarnya dapat dilakukan secara bebas, namun harus memenuhi dua kondisi sebagai berikut (Simpson dan Bahr, 2005):

- a. Frekuensi atau periode yang dipilih sebaiknya seimbang untuk setiap skala logaritmik. Misalnya, jika kita memilih periode 10 sekondan 15 sekondan, maka sebaiknya kita juga memilih periode 100 sekondan 150 sekondan (dibandingkan 100 sekondan dan 105 sekondan). Hal ini dikarenakan kesalahan relatif dari kedalaman penetrasi akan menjadi sama untuk periode pada orde 10 sekondan dan orde 100 sekondan.
- b. Idealnya, kita sebaiknya mempunyai 6-10 frekuensi per dekade. Frekuensi yang lebih banyak tidak diperlukan karena berdasarkan relasi dispersi Weidelt, hal ini akan memprediksikan hasil yang sama untuk frekuensi yang berdekatan. Namun, frekuensi yang lebih sedikit dapat mengakibatkan adanya *aliasing*.

Sebelum data ini dapat diolah menjadi data impedansi, kita perlu menghilangkan efek bias yang ditimbulkan dari *noise*. Proses penghilangan *noise* ini dilakukan dengan teknik *robust*. Teknik ini dilakukan dengan mengeliminasi pengaruh dari titik data (disebut dengan *outlier*) yang tidak merepresentasikan keseluruhan data. Proses perhitungan teknik *robust* ini sendiri melibatkan

algoritma yang setipe dengan algoritma teknik *least square*, tetapi dengan menghitung bobot dari setiap data (Simpson dan Bahr, 2005).



Gambar 2.5 Ilustrasi perhitungan teknik *robust* (Simpson dan bahr, 2005)

Gambar 2.5 di atas mengilustrasikan teknik *robust* secara sederhana, di mana data-data yang jauh dari nilai rata-rata atau yang biasa disebut dengan *outlier* dihilangkan bobotnya dalam iterasi selanjutnya.

Kemudian, setelah *noise* dari data dikurangi dengan teknik *robust*, kita dapat menghitung nilai impedansi, resistivitas semu dan fase. Impedansi merupakan perbandingan antara medan listrik dan medan magnet. Secara eksplisit, hubungan linier antara medan listrik, medan magnet, dan impedansi dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut (Smirnov, 2003):

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

di mana $Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$ merepresentasikan tensor impedansi.

Bentuk matriks impedansi bergantung pada dimensionalitas medium (Simpson & Bahr, 2005) :

- Medium 3-D

Matriks impedansi memiliki 4 komponen yang independen.

- Medium 2-D

Pada umumnya, matriks impedansi memiliki 3 komponen independen dengan bentuk sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Z & Z_{xy} \\ Z_{yx} & -Z \end{bmatrix}$$

Namun, bila pengukuran dilakukan dengan menggunakan koordinat yang sejajar atau tegak lurus terhadap arah *strike*, maka matriks impedansi hanya memiliki 2 komponen independen dengan bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

- Medium 1-D

Matriks impedansi hanya memiliki 1 komponen independen dengan bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 0 & Z \\ Z & 0 \end{bmatrix}$$

Resistivitas semu, ρ_a , untuk lapisan Bumi diperoleh dari persamaan sebagai berikut (Cagniard, 1953):

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.6)$$

Dua modulus independen dari impedansi dianalisis untuk analisis pendekatan Bumi 2-D dalam sistem koordinat Kartesian dengan y searah dengan arah *strike* dan x tegak lurus terhadap arah struktur geologi. Modus *Transverse electric* (TE) adalah modulus yang ketika medan listrik searah dengan struktur geologi. Modus *Transversemagnetic* (TM) adalah modulus yang ketika medan magnet searah dengan struktur geologi. Bagian diagonal dari impedansi tensor untuk pendekatan Bumi 2-D adalah nol:

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

di mana

$$Z_{xy} = Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.7)$$

$$Z_{yx} = Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} \quad (2.8)$$

Dengan demikian, nilai resistivitas semu dapat didefinisikan sebagai :

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad (2.9)$$

dan

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2 \quad (2.10)$$

Sedangkan fase, dapat didefinisikan sebagai :

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{xy}\}}{\text{Re}\{Z_{xy}\}} \right) \quad (2.11)$$

$$\phi_{yx} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{yx}\}}{\text{Re}\{Z_{yx}\}} \right) \quad (2.12)$$

2.5 Prinsip Dasar Kalibrasi Data MT

Dalam melakukan akuisisi MT di lapangan, alat yang digunakan harus dikalibrasi sebelumnya dan sebaiknya dikalibrasi ulang di akhir survey. Kalibrasi mungkin juga diperlukan saat akuisisi lapangan, misalnya ketika alat mengalami kerusakan. Pada proses kalibrasi, kita mengukur respon alat terhadap sinyal masukan yang telah ditentukan. 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 pengaturan yang cocok untuk kondisi lapangan survey.

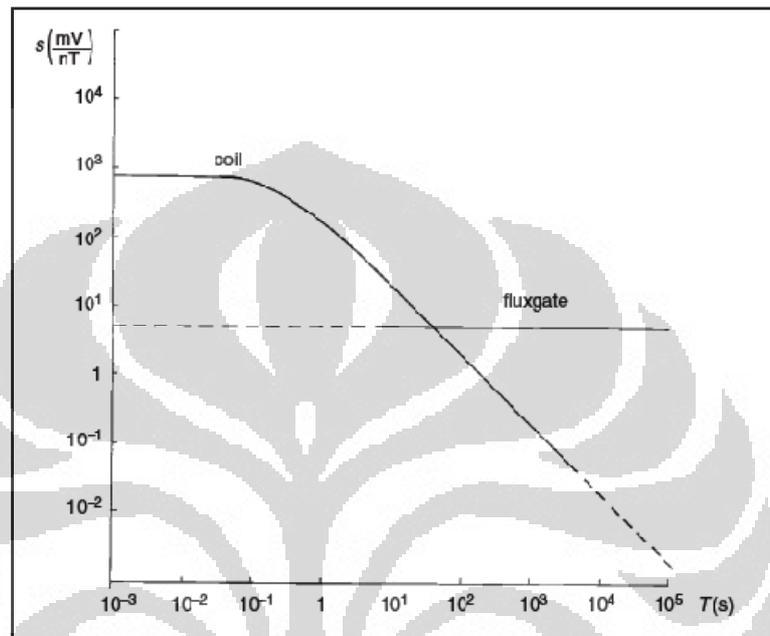
Proses perhitungan kalibrasi terdiri dari 4 tahap, yaitu :

1. Kalibrasi sensor yang tidak bergantung terhadap frekuensi.

Kalibrasi sensor disebut juga sensitivitas. Untuk sensor magnetik, satuan dari sensitivity adalah VT^{-1} atau umumnya mVnT^{-1} . Misalnya, seperti pada

gambar, *fluxgate magnetometer* mempunyai sensitivitas $S_B = 5\text{mVnT}^{-1}$. Untuk sensor listrik, sensitivitasnya mempunyai satuan $\text{mV}(\text{mV/m})^{-1}$ yang dihitung dari faktor amplifikasi A dari *amplifier* dan jarak antar elektroda d , yang dirumuskan :

$$S_E = A \times d \quad (2.13)$$



Gambar 2.6 Kurva sensitivitas sensor magnetik (koil induksi dan *fluxgate magnetometer*) terhadap periode.

2. Kalibrasi sensor yang bergantung terhadap frekuensi

Untuk beberapa sensor, seperti koil induksi seperti pada gambar mempunyai sensitivitas yang bergantung pada frekuensi. Sensitivitas yang bergantung pada frekuensi ini dideskripsikan sebagai bilangan kompleks yang tidak berdimensi $w_m = w(f_m)$ di mana f_m merupakan frekuensi ke- m dari hasil transformasi Fourier.

3. Kalibrasi dari *analog to digital converter*

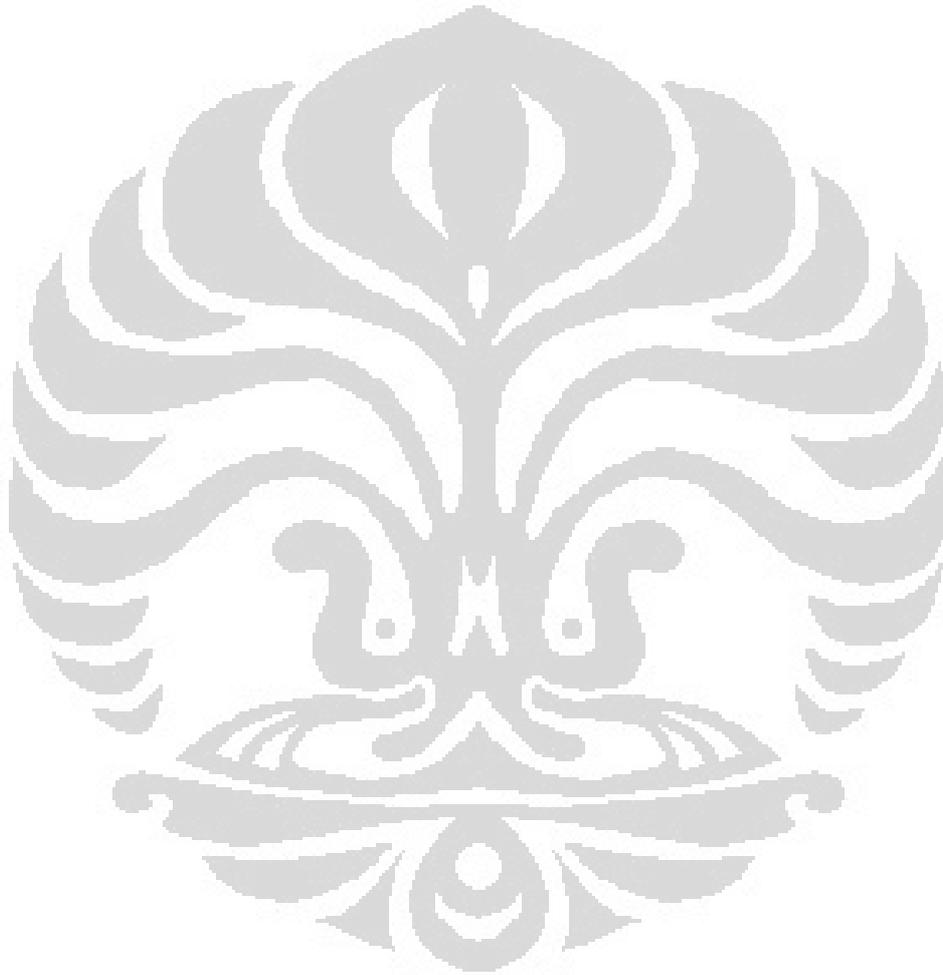
Kalibrasi ini memperhitungkan resolusi dari *analog to digital converter*. Misalnya untuk alat MT modern menggunakan 2^{24} level kuantisasi (Unsworth, 2008). Jika alat ini mempunyai jangkauan voltase dari -5V sampai dengan $+5\text{V}$, maka *least count* (lc) akan bernilai $10\text{V}/16777216$ bit.

4. Perhitungan koefisien kalibrasi pada hasil transformasi fourier.

Pada prinsipnya, faktor kalibrasi pada poin 1 dan 3 dapat diaplikasikan pada tahap mana saja pada saat pengolahan data. Namun, untuk poin 2, harus diaplikasikan pada tahap setelah dilakukan transformasi Fourier. Persamaan umum perhitungan kalibrasi pada data MT dapat dinyatakan dalam:

$$\tilde{X}_m \rightarrow lc \times w(f_m)^{-1} \times S_B^{-1} \times \tilde{X}_m \quad (2.14)$$

$$\tilde{N}_m \rightarrow lc \times w(f_m)^{-1} \times S_E^{-1} \times \tilde{N}_m \quad (2.15)$$

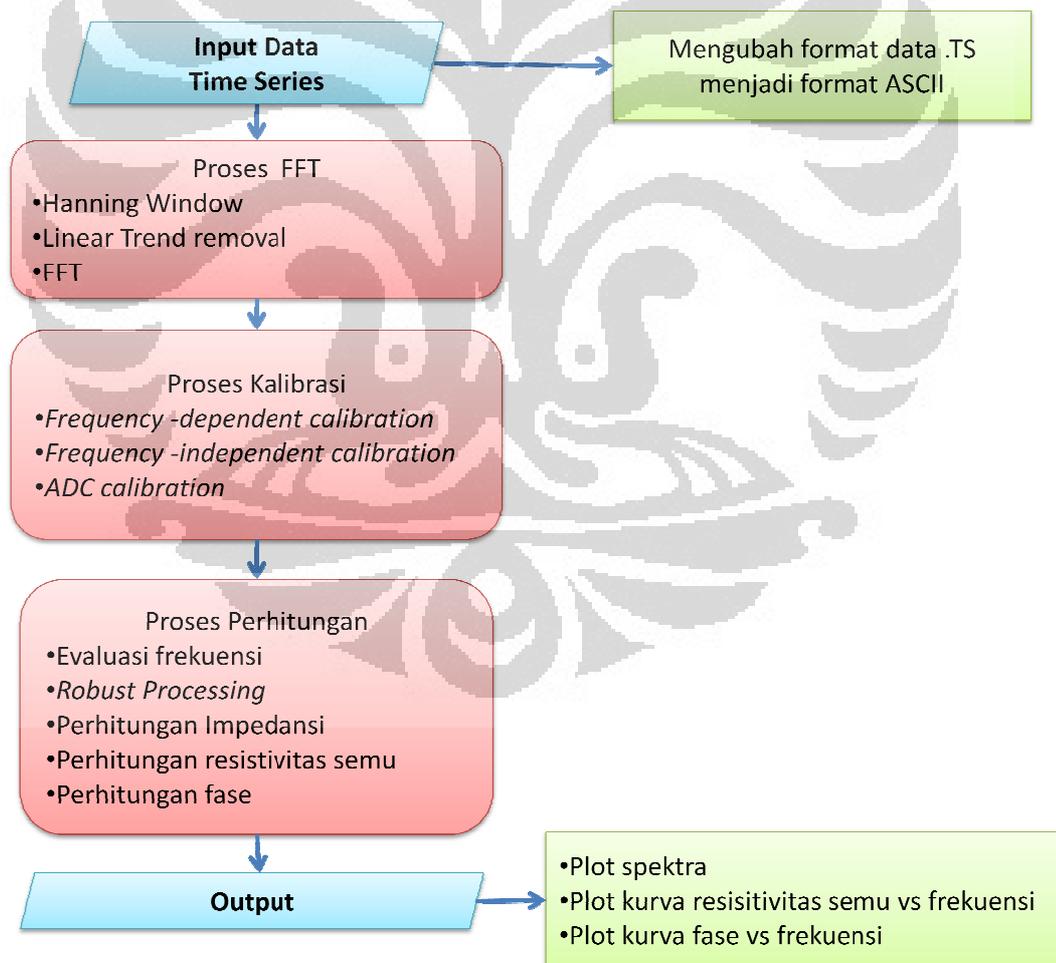


BAB 3

PEMBUATAN PROGRAM DAN PENGOLAHAN DATA

3.1 Pembuatan Program dengan MATLAB

Pengolahan data MT yang dilakukan dengan membuat program menggunakan MATLAB dari data mentah berupa *time series* sampai dengan data berupa resistivitas semu dan fase sebenarnya telah dibuat oleh dua peneliti terdahulu, yaitu Heditama (2011) dan Rusbiyanto (2011). Pada penelitian kali ini, penulis menambahkan proses perhitungan kalibrasi yang dilakukan pada data MT. Diagram alir pengolahan data MT yang menggunakan MATLAB dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1. Diagram alir pengolahan data *time series* di MATLAB.

3.1.1 Data *Time Series*

Pengolahan data MT dilakukan dengan membuat *source code* menggunakan MATLAB, dimulai dari proses pembacaan data mentah yang berupa *time series* melalui serangkaian proses, termasuk kalibrasi, hingga mendapatkan nilai resistivitas semu dan fase. Data *time series* yang didapatkan dari akuisisi lapangan mempunyai format biner dengan ekstensi '.TS', yaitu '.TS3', '.TS4', dan '.TS5'. Setiap data terdiri atas lima komponen, yaitu Ex, Ey, Hx, Hy, dan Hz. Masing-masing data mempunyai karakteristik tersendiri dalam hal *sampling rate*, yaitu untuk data '.TS3' terdiri atas 2400 data setiap sekon, data '.TS4' terdiri atas 150 data setiap sekon, dan data '.TS5' terdiri atas 15 data setiap sekon. Dengan kata lain, data '.TS3' mempunyai frekuensi yang paling tinggi dan data '.TS5' mempunyai frekuensi yang paling rendah. Data *time series* harus diubah dulu menjadi berformat ASCII agar dapat diproses menggunakan MATLAB.

3.1.2 Proses FFT

Proses ini meliputi 3 proses perhitungan, yaitu :

a. *Fast Fourier Transform*

Data *time series* yang sudah berformat ASCII selanjutnya diproses dengan menggunakan *fast fourier transform* untuk mengubahnya menjadi data *frequency domain*. Pada program MATLAB sudah tersedia fungsi eksternal untuk melakukan perhitungan FFT, yaitu :

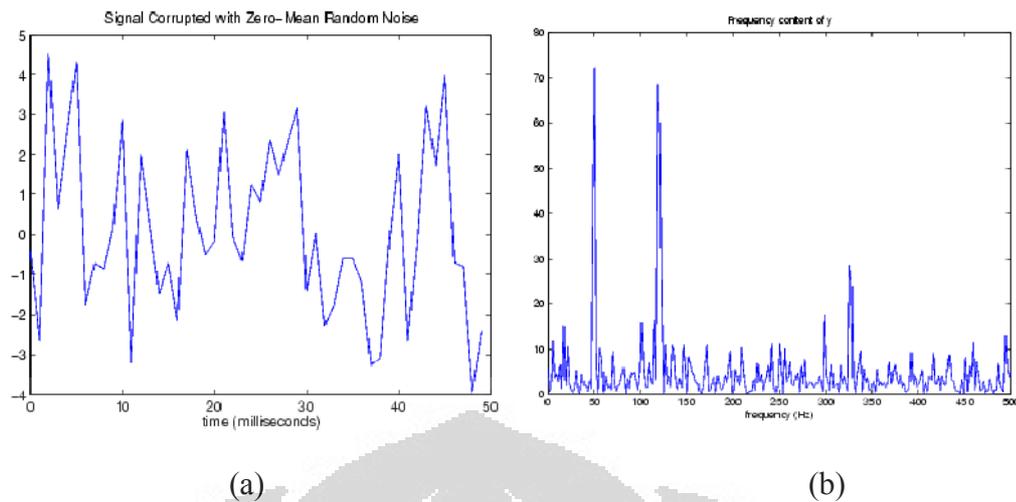
$$X = fft(x)$$

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (3.1)$$

$$x = ifft(X)$$

$$x(j) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (3.2)$$

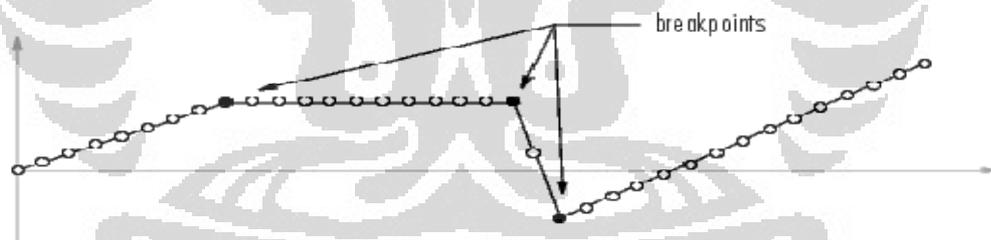
di mana $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$.



Gambar 3.2. Bentuk data dalam domain (a) waktu, (b) frekuensi (The Math Works, Inc, 2010)

b. *Linear trend removal*

Proses ini digunakan untuk menghilangkan tren linier dari suatu vektor atau matriks. Proses ini biasanya digunakan dalam proses FFT. Dalam program MATLAB juga telah tersedia fungsi eksternal untuk proses ini, yaitu $y = \text{detrnd}(x)$.



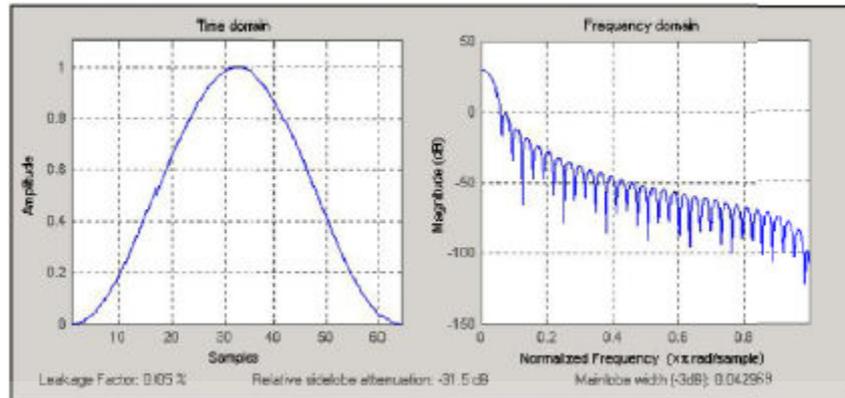
Gambar 3.3. Proses penghilangan tren linier (The Math Works, Inc., 2010)

c. *Hanning window*

Proses ini digunakan untuk mengembalikan simetri dari titik ke- n dalam kolom vektor w (The Math Works, Inc., 2010). N harus bernilai integer positif. Koefisien dari *hann window* dihitung dari persamaan :

$$w[k + 1] = 0.5 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{k}{n-1} \right) \right) \quad (3.3)$$

dengan $k=0, \dots, n-1$. Dalam MATLAB, fungsi eksternal untuk perhitungan ini juga telah tersedia, yaitu dengan menggunakan fungsi $w = \text{hann}(n)$.



Gambar 3.4. Proses *hanning window* (The Math Works, Inc., 2010)

3.1.3 Perhitungan Kalibrasi

Data kalibrasi yang terekam pada saat proses kalibrasi sebelum melakukan akuisisi MT terdiri dari 2 jenis file, yaitu file yang berekstensi ‘.CLC’ dan ‘.CLB’. File yang berekstensi ‘.CLC’ untuk kalibrasi sensor dan ‘.CLB’ untuk kalibrasi boks. File kalibrasi boks menyimpan faktor kalibrasi dari boks alat MT untuk setiap frekuensi. Sedangkan file kalibrasi sensor menyimpan nilai faktor kalibrasi sensor untuk setiap frekuensi. File kalibrasi boks berisi 11 kolom data yang terdiri atas frekuensi, dan besar dan derajat dari 5 komponen yang terukur (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z). Sedangkan file kalibrasi sensor terdiri atas 3 kolom data yang berupa frekuensi dan besar serta derajat dari komponen magnetik yang terukur (H_x atau H_y atau H_z saja).

Proses perhitungan kalibrasi yang dilakukan oleh penulis sendiri meliputi 3 tahap, yaitu :

a. Kalibrasi Boks

Boks alat MT terdiri atas 5 *channel* yang terhubung ke sensor untuk masing-masing Kalibrasi yang direkam adalah koefisien kalibrasi yang berupa sensitivitas boks yang berubah nilainya untuk setiap frekuensi sehingga file kalibrasi boks berisi 11 kolom data yang terdiri atas frekuensi, dan nilai dan derajat dari 5 komponen yang terukur (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z). Faktor kalibrasi ini merupakan bilangan kompleks dalam bentuk nilai dan sudut fasenya. Perhitungan kalibrasi ini dilakukan dengan cara membagi nilai medan magnet auat medan listrik terukur dengan faktor kalibrasi dan dilakukan setelah proses FFT karena

faktor kalibrasi harus dilakukan pada data dalam domain frekuensi untuk nilai frekuensi tertentu.

```

C:\MTU-Data\JL\CAL\MTUA1627_CLB : Instrument Calibrations
MTUA1627.CLB      Normalizing E-gain: 1 H-gain: 1

```

channel	Freq (Hz)	mV / mV	Degrees
1	10400	0.7424039	-19
2	10400	0.7472712	-18
3	10400	0.7692012	2
4	10400	0.7736111	3
5	10400	0.7638872	3
1	8800	0.7616829	-18
2	8800	0.7657107	-17
3	8800	0.7785144	0
4	8800	0.7823206	0
5	8800	0.7732197	0
1	7200	0.8196228	-16
2	7200	0.8230328	-16
3	7200	0.8282771	-2
4	7200	0.8313147	-2
5	7200	0.8229245	-1
1	6000	0.8627514	-15
2	6000	0.8653694	-14
3	6000	0.8660172	-2
4	6000	0.8684759	-2
5	6000	0.8603371	-2
1	5200	0.8904735	-13
2	5200	0.8926223	-13
3	5200	0.8903437	-3
4	5200	0.8923303	-3
5	5200	0.8845958	-2
1	4400	0.9165175	-12
2	4400	0.9182221	-11
3	4400	0.9133251	-3
4	4400	0.914804	-3
5	4400	0.9074954	-2
1	3600	0.9397159	-10
2	3600	0.9409546	-10
3	3600	0.9338196	-3
4	3600	0.9348109	-2
5	3600	0.9279312	-2
1	3000	0.9549534	-8
2	3000	0.9558898	-8
3	3000	0.9473187	-2
4	3000	0.9479932	-2
5	3000	0.9413925	-2
1	2600	0.9642344	-7
2	2600	0.9649925	-7

Gambar 3.5. Contoh data kalibrasi boks dari alat MT

b. Kalibrasi Sensor

Faktor kalibrasi ini merupakan sensitivitas sensor magnetik maupun listrik yang digunakan dalam proses akuisisi. Untuk sensor magnetik yang berupa koil induksi, yang digunakan dalam akuisisi lapangan pada data untuk penelitian ini, nilainya berubah-ubah untuk setiap frekuensi. Sensitivitas inilah yang tersimpan dalam file '.CLC' yang terdiri atas 3 kolom data yang berupa frekuensi dan besar serta derajat dari komponen magnetik yang terukur untuk setiap sensor Hx, Hy atau Hz. Faktor kalibrasi ini merupakan bilangan kompleks dalam bentuk nilai

dan sudut fasenya. Sedangkan jika sensor magnetiknya berupa *fluxgate magnetometer*, nilainya tidak berubah terhadap frekuensi dan nilainya tercantum pada spesifikasi sensor. Untuk sensor listrik, nilai juga tidak berubah-ubah terhadap frekuensi, namun berubah tergantung kepada jarak elektroda yang digunakan. Jadi, untuk melakukan kalibrasi sensor magnetik, perlu dilihat dulu jenis sensor apa yang digunakan. Proses perhitungannya sendiri dilakukan Perhitungan kalibrasi ini dilakukan dengan cara membagi nilai medan magnet kuat medan listrik terukur dengan faktor kalibrasi dan dilakukan setelah FFT, atau untuk kalibrasi sensor yang tidak berubah-ubah terhadap waktu dapat juga dilakukan sebelum dilakukan FFT.

```

C:\MTU-Data\JL\CAL\COIL1815_CLC : Coil Calibrations
COIL1815.CLC      Normalizing Factor: 1000.0 mV/nT

```

Channel	Freq (Hz)	mV / mV	Degrees
1	388.2353	0.3669725	-87.99469
1	317.6471	0.2777525	-70.25426
1	264.7059	0.248929	-59.0322
1	229.4118	0.2337643	-51.59105
1	194.1176	0.2246737	-46.05074
1	158.8235	0.2175606	-40.71909
1	132.3529	0.2139667	-37.18011
1	114.7059	0.2131942	-36.17743
1	97.05882	0.212485	-35.16147
1	79.41177	0.2118398	-34.12849
1	66.17647	0.2113981	-33.3378
1	57.35294	0.2238915	-31.81203
1	48.52941	0.2331971	-34.21581
1	39.70588	0.258272	-37.83282
1	32.5	0.2818797	-41.9812
1	27.5	0.2936833	-43.73734
1	22.5	0.3292966	-45.89075
1	18.75	0.3634966	-46.8296
1	16.25	0.4024165	-46.77363
1	13.75	0.4574187	-46.20102
1	11.25	0.5349917	-44.4906
1	9.375	0.6104745	-42.67459
1	8.125	0.6609527	-41.59177
1	6.875	0.7480403	-39.62029
1	5.625	0.8326017	-37.16146
1	4.6875	0.9153118	-32.29807
1	4.0625	0.961525	-29.97646
1	3.4375	1.022921	-24.86109
1	2.8125	1.045631	-19.1703
1	2.34375	1.084627	-14.61278
1	2.03125	1.120575	-11.52074
1	1.71875	1.134556	-7.132281
1	1.40625	1.161352	-2.003411
1	1.171875	1.182896	2.417094
1	1.015625	1.171442	5.571352
1	0.859375	1.155493	9.361034
1	0.703125	1.130706	14.15085
1	0.5859375	1.102013	18.97514
1	0.5078125	1.073197	22.95498
1	0.4296875	1.031469	27.81691
1	0.3515625	0.9690035	33.91687
1	0.2929688	0.900959	39.60523

Gambar 3.6. Contoh data kalibrasi sensor dari koil induksi.

c. *Analog to digital converter calibration.*

Kalibrasi ini biasanya disebut sebagai *least count (l.c.)*. Nilainya tidak bergantung terhadap frekuensi, sehingga perhitungannya bisa dilakukan setelah ataupun sebelum dilakukan FFT dengan cara mengalikan nilai lc terhadap data nilai medan magnet atau medan listrik terukur.

3.1.4 Perhitungan Impedansi, Resistivitas Semu dan Fase

Setelah semua data dalam domain frekuensi terkalibrasi, maka kita dapat menghitung impedansinya dengan persamaan berikut (Gamble, et all., 1979):

$$Z^R = [ER][HR]^{-1} \quad (3.5)$$

dengan

$$[ER] = \begin{bmatrix} E_x R_x^* & E_x R_y^* \\ E_y R_x^* & E_y R_y^* \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[HR]^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} H_x R_x^* & H_x R_y^* \\ H_y R_x^* & H_y R_y^* \end{bmatrix}}{H_x R_x^* H_y R_y^* - H_y R_x^* H_x R_y^*} \quad (3.7)$$

Sehingga nilai impedansi akan berbentuk matrik 2 x 2 $Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$.

Resistivitas semu serta fasenya dapat didefinisikan :

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad (3.8)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2 \quad (3.9)$$

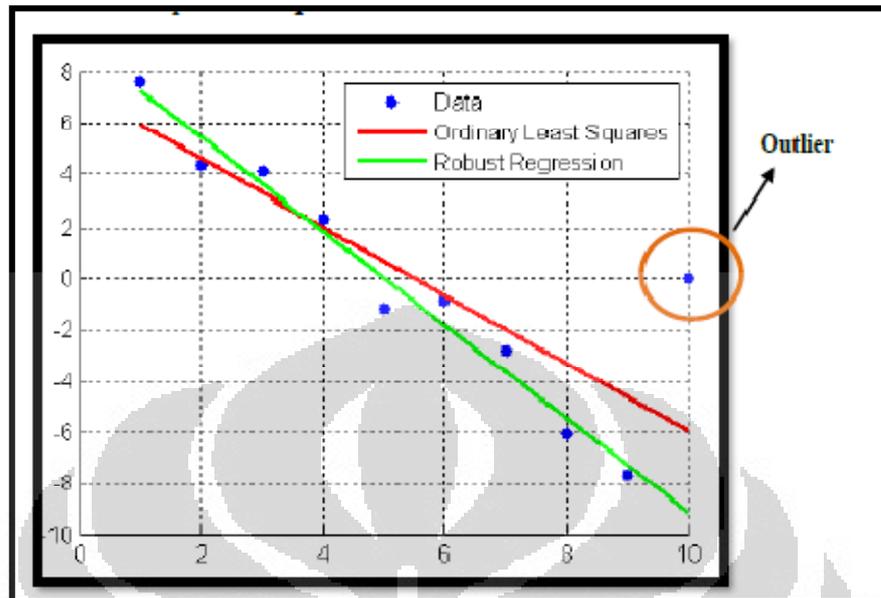
$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{xy}\}}{\text{Re}\{Z_{xy}\}} \right) \quad (3.10)$$

$$\phi_{yx} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{yx}\}}{\text{Re}\{Z_{yx}\}} \right) \quad (3.11)$$

3.1.5 Estimasi Robust

Proses teknik robust merupakan salah satu proses statistik yang bertujuan untuk menghilangkan noise pada data MT. Pada prinsipnya, teknik robust hampir sama dengan teknik *least square*, yaitu mengikuti *trend* data yang lebih dominan dan meminimalisasi pengaruh *outlier* terhadap data. Akan tetapi, pengaruh *outlier* pada robust disini lebih sedikit dibandingkan dengan *least square*. Sehingga

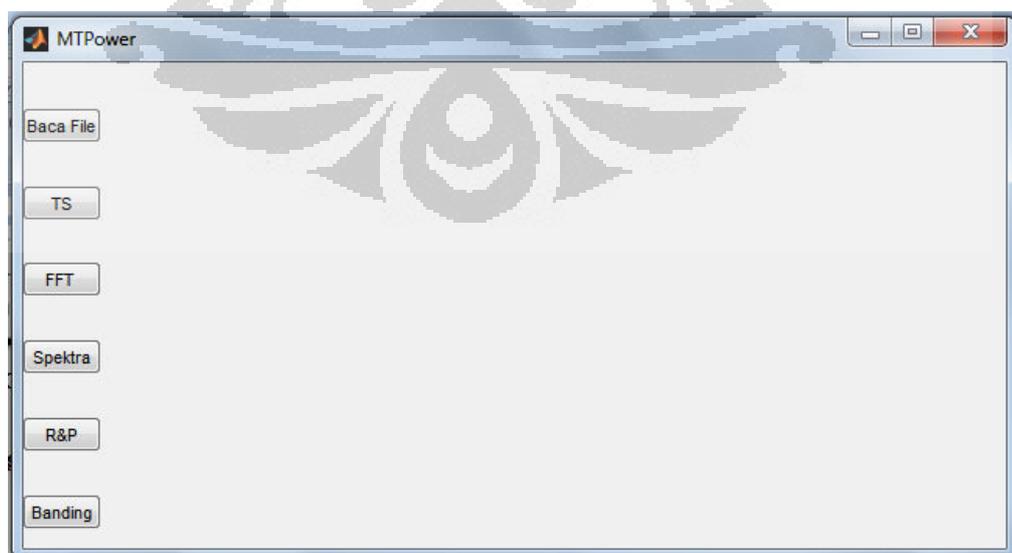
grafik hasil dari teknik robust akan terlihat lebih bagus dibandingkan dengan *least square*.



Gambar 3.7. Perbandingan teknik *robust* dan *least square*

3.2 Penggabungan *Graphical User Interface (GUI)* dengan *source code* pada **MATLAB**

Setelah semua *source code* disempurnakan dengan menambahkan perhitungan kalibrasi, maka penulis menghubungkan *source code* yang baru dengan GUI yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya yaitu Dzil Mulki Heditama dan Andy Rusbianto.



Gambar 3.8 Tampilan GUI

Pada tampilan GUI tersebut terdiri atas 6 tombol yang mempunyai fungsi masing-masing, yaitu :

a. Baca File

Tombol ini digunakan untuk mengubah data dalam format biner dengan ekstensi '.TS' menjadi berformat ASCII yang berekstensi '.txt'.

b. TS

Tombol ini digunakan untuk menampilkan bentuk sinyal gelombang pada data *time series*.

c. FFT

Tombol ini berfungsi untuk melakukan proses transformasi Fourier dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* dari data dalam domain waktu menjadi data dalam domain frekuensi. Dan pada tombol ini juga melakukan proses *remove linear trends*, *hanning window*, perhitungan impedansi, resistivitas semu, dan fase untuk data MT.

d. Spektra

Tombol ini berfungsi untuk menampilkan bentuk spektra dari hasil transformasi fourier.

e. R&P

Tombol ini berfungsi untuk menampilkan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan fase vs frekuensi hasil pengolahan data.

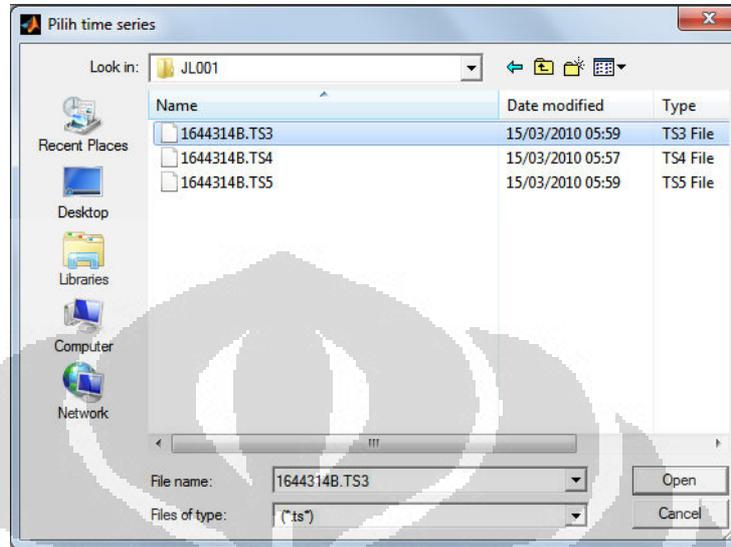
f. Banding

Tombol ini berfungsi untuk membandingkan hasil pengolahan data MT yang berupa resistivitas semu dan fase yang diolah dengan menggunakan MATLAB dengan data MT yang diolah dengan menggunakan SSMT.

3.3 Pengolahan Data Menggunakan MTPower

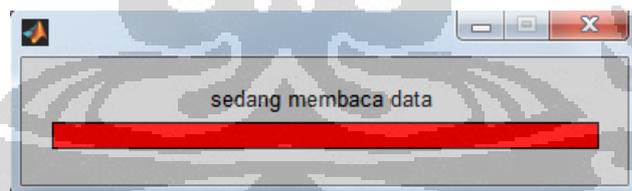
Pada penelitian ini, penulis akan melakukan pengolahan data dengan menggunakan MTPower dengan melibatkan kalibrasi dan kemudian membandingkan hasilnya. Berikut langkah-langkah yang digunakan :

1. Buka tampilan GUI yang telah dibuat, lalu tekan tombol **Baca File**, sehingga muncul kotak dialog ‘Pilih time series’ lalu masukkan data lokal ‘.TS’ yang akan diproses.



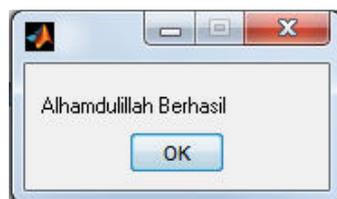
Gambar 3.9. Kotak dialog ‘Pilih time series’.

Kemudian, data time series tersebut akan diubah formatnya dari data ‘.TS’ menjadi berformat ‘.txt’. Hal ini perlu dilakukan karena data ‘.TS’ yang masih berupa data biner tidak dapat diolah di MATLAB.



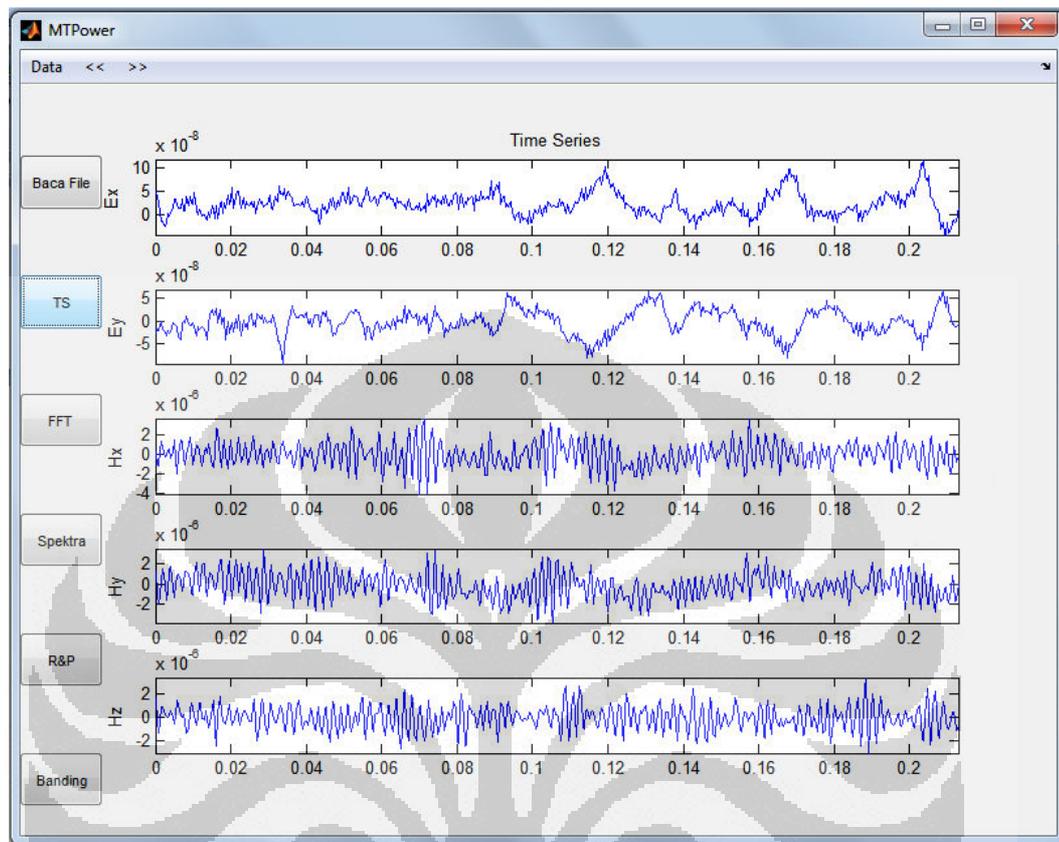
Gambar 3.10. Kotak dialog ‘sedang membaca data’.

Jika berhasil, maka akan muncul kotak dialog ‘Alhamdulillah Berhasil’.



Gambar 3.11 kotak dialog ‘Alhamdulillah Berhasil’.

- Setelah itu, kita dapat menampilkan bentuk dan data sinyal gelombang data MT dengan menekan tombol **TS**.

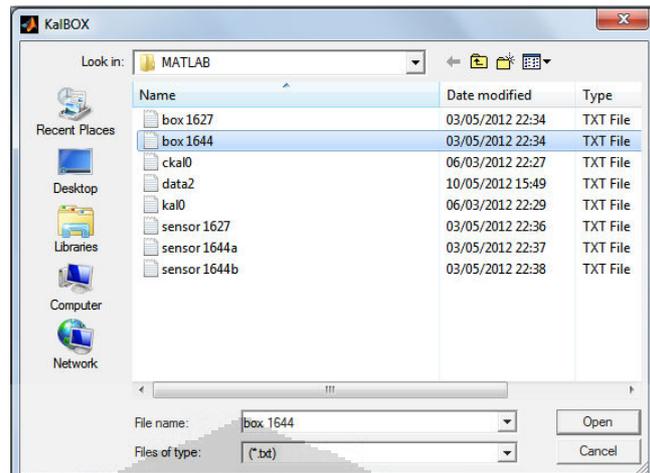


Gambar 3.12. Tampilan sinyal *time series* data MT

- Selanjutnya tekan tombol **FFT**, masukkan data TS. Kemudian masukkan juga data kalibrasi box dan sensor.



Gambar 3.13 Kotak dialog 'Masukkan data TS'.

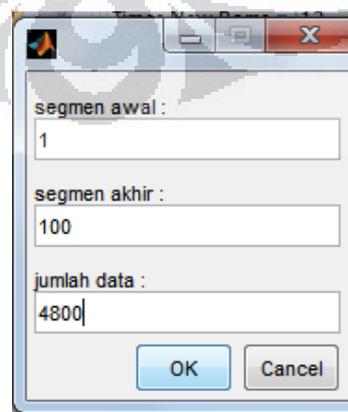


Gambar 3.14 Kotak dialog 'KalBOX'



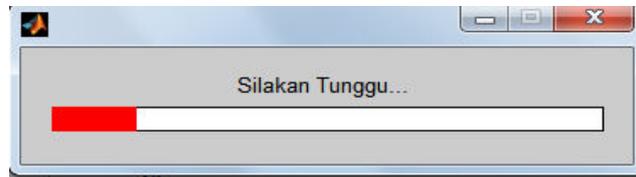
Gambar 3.15 Kotak dialog 'KalSensor'

Selanjutnya masukkan segmen yang akan diolah dan jumlah data pada kotak dialog. Jumlah data di sini adalah jumlah data yang terdapat pada setiap segmen.



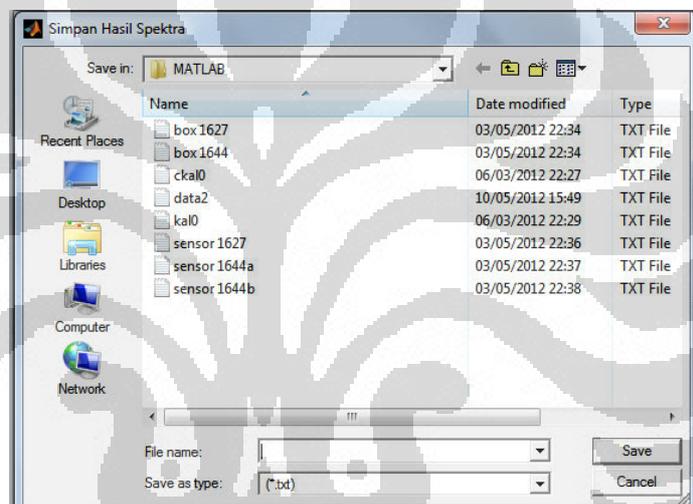
Gambar 3.16 Kotak dialog 'segmen'

Selanjutnya program akan melakukan proses perhitungan FFT (termasuk *hanning window* dan *trend removal*). Selama program melakukan perhitungan ini akan muncul kotak dialog ‘Silakan Tunggu ...’

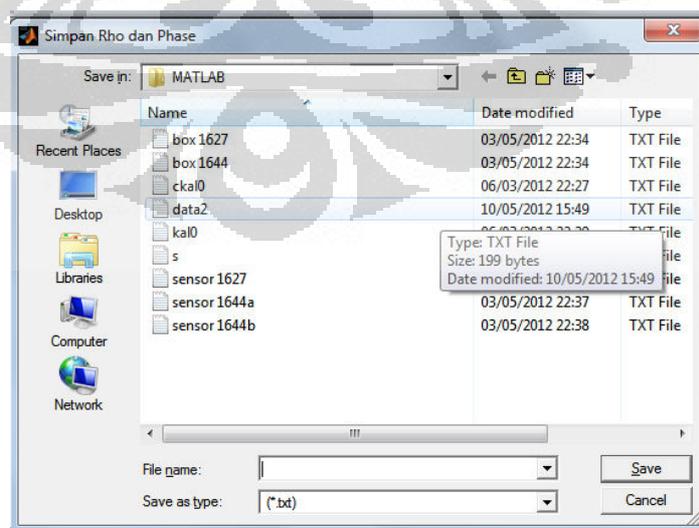


Gambar 3.17 Kotak dialog ‘Silahkan Tunggu...’

Jika program telah selesai menghitung akan muncul kotak dialog untuk menyimpan spektra dan rho dan fase yang didapatkan.

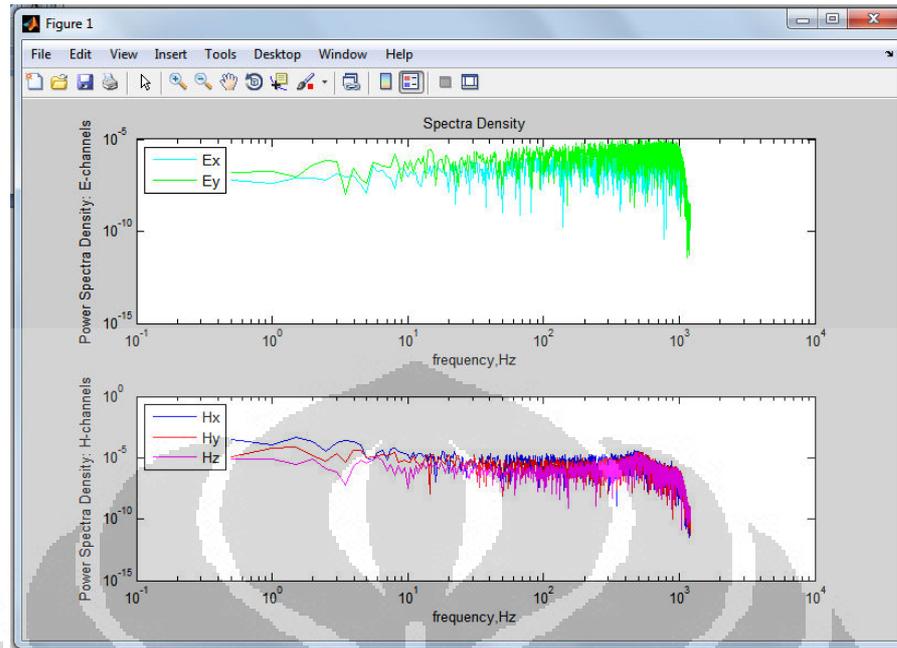


Gambar 3.18 Kotak dialog ‘Simpan Hasil Spektra’



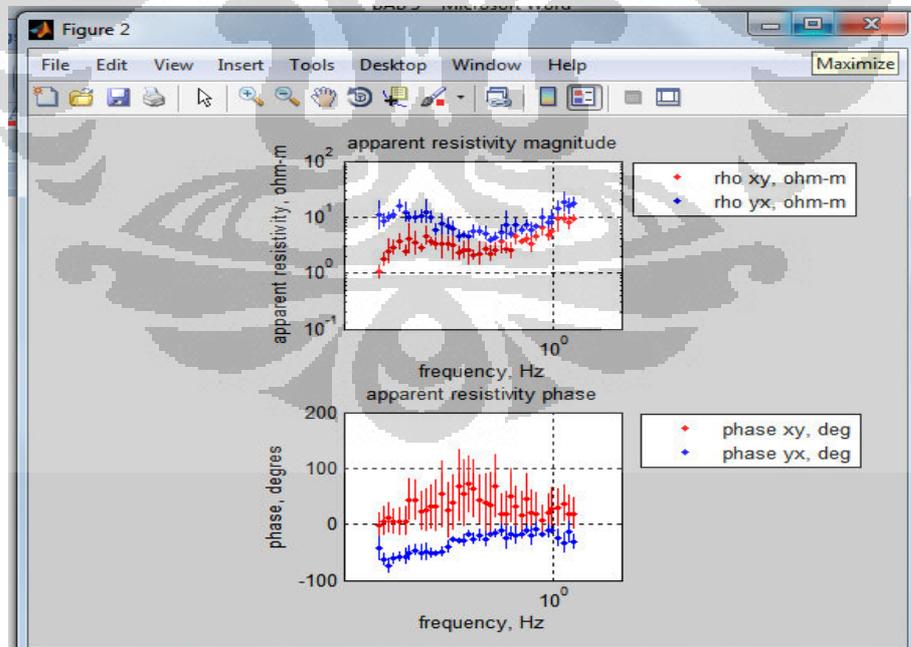
Gambar 3.19 Kotak dialog ‘Simpan Rho dan Phase’

4. Untuk melihat kurva spektra, tekan tombol **Spektra**.



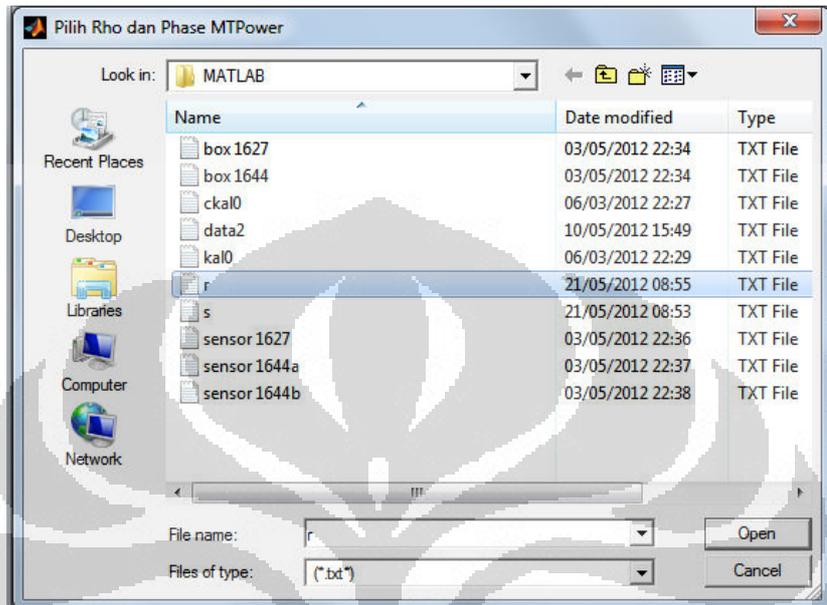
Gambar 3. 20 Tampilan kurva spektra.

5. Sedangkan untuk melihat kurva resistivitas semu vs frekuensi dan fase vs frekuensi, tekan tombol **R&P**.

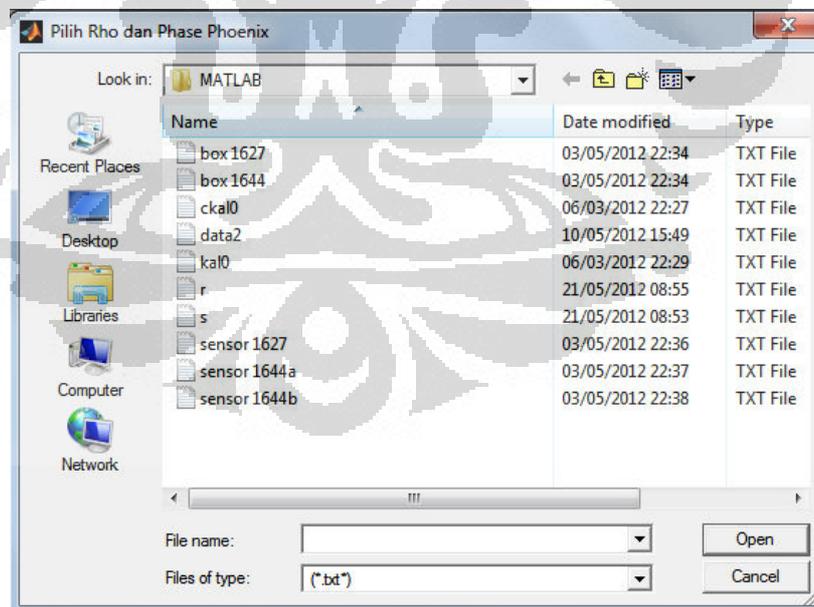


Gambar 3.21 Tampilan kurva resistivitas semu dan fase vs frekuensi.

6. Jika kita ingin membandingkan dengan data hasil pengolahan dengan menggunakan SSMT, maka tekan tombol **Banding**, masukkan data rho dan fase dari MATLAB dan SSMT.

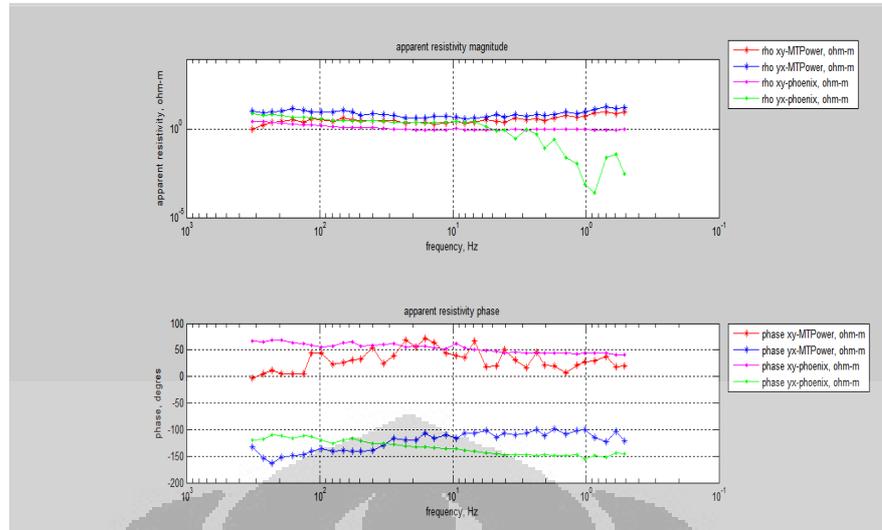


Gambar 3.22. Kotak dialog 'Pilih Rho dan Phase MTPower'



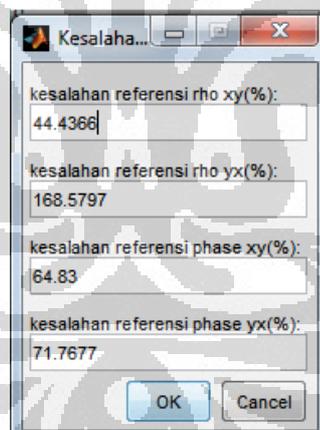
Gambar 3.23 Kotak dialog 'Pilih Rho dan Phase Phoenix'

Selanjutnya akan muncul kurva resistivitas semu dan fase vs frekuensi untuk setiap modus TE dan TM untuk MATLAB dan SSMT.



Gambar 3.24 Tampilan perbandingan hasil pengolahan menggunakan MATLAB dan SSMT.

Jika ingin melihat kesalahan referensi yang dimiliki dari pengolahan data MT menggunakan MATLAB yang dibandingkan dengan data dengan SSMT, maka pilih menu **kesalahan referensi**.



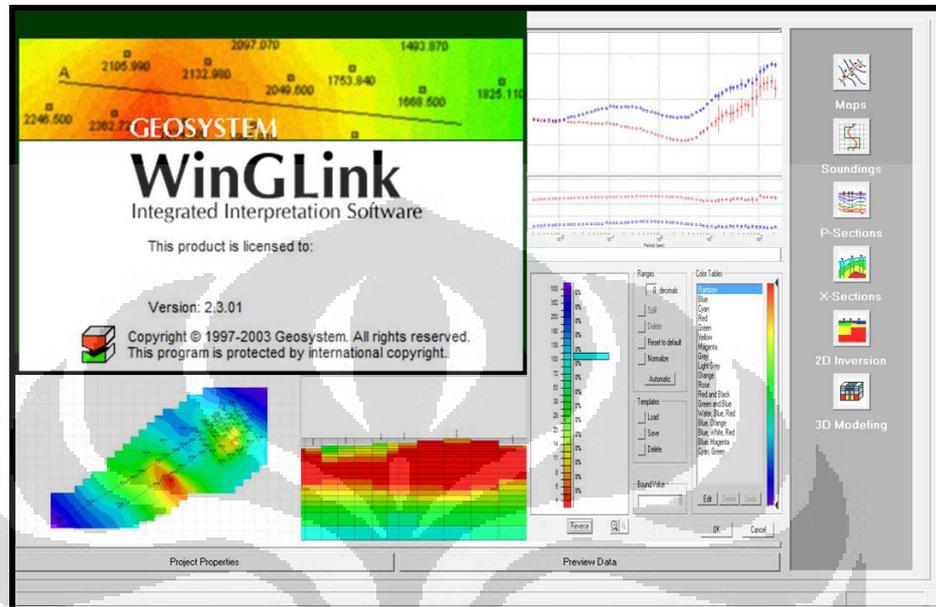
Gambar 3.25 Kotak dialog 'Kesalahan Referensi'.

3.4 Inversi 2D menggunakan WinGLink

Setelah dihasilkan nilai resistivitas semu dan fase dalam domain frekuensi, langkah selanjutnya adalah dengan menginversi hasil yang diperoleh menggunakan *software* WinGLink. Pada penelitian ini, inversi dilakukan untuk melihat persebaran *true resistivity* untuk keperluan analisis lebih lanjut. Inversi

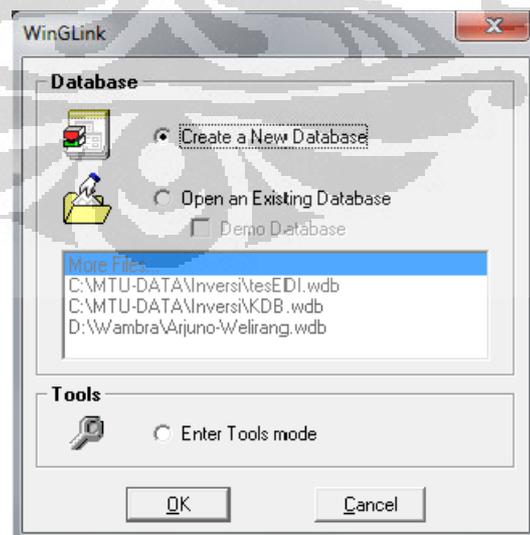
dilakukan pada hasil dari pengolahan data keempat titik MT tersebut. Berikut langkah-langkah inversi 2D dengan menggunakan *software* WinGLink:

1. Membuka program WinGLink, sehingga muncul tampilan awal seperti pada Gambar 3.26.



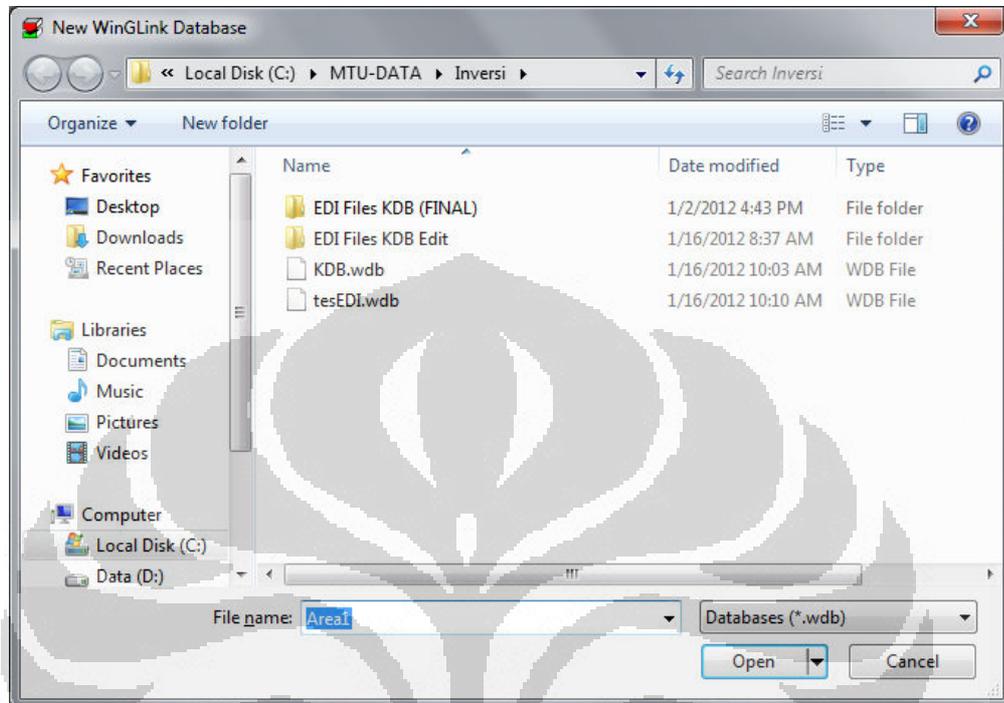
Gambar 3.26. Tampilan awal WinGLink

2. Membuat *database* dengan mengklik **Create a New Database** lalu **OK**. Jika sudah membuat database sebelumnya, bisa langsung menggunakan **Open an Existing Database**.



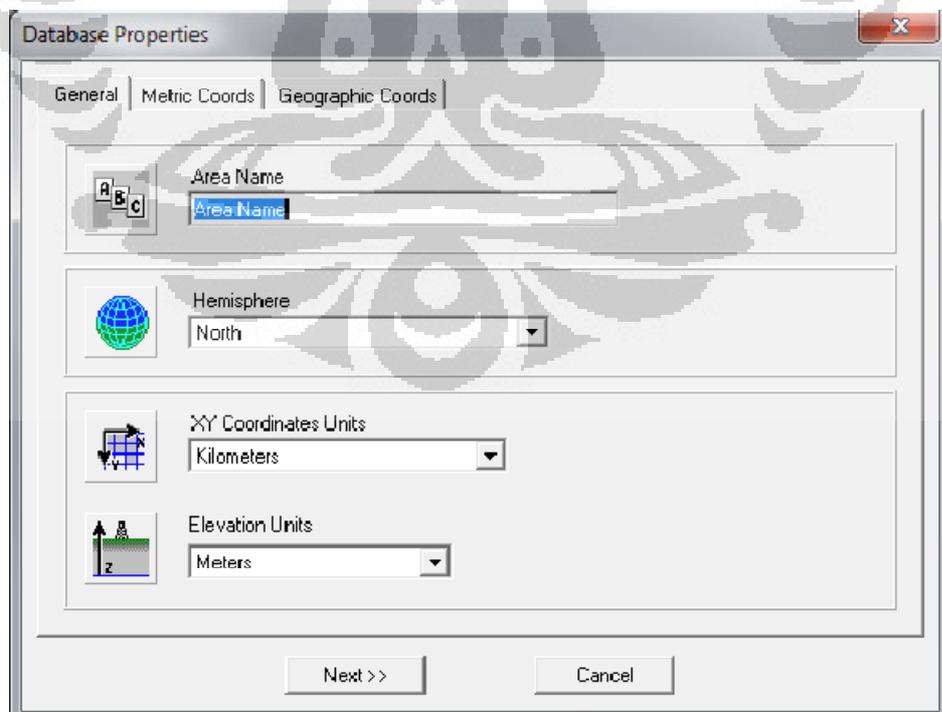
Gambar 3.27. Kotak dialog 'Database'

Selanjutnya, membuat File name untuk database. Tentukan lokasi penyimpanan database file, masukan **File name** → **Open**



Gambar 3.28 Kotak dialog 'New WinGLink Database'.

Kemudian, mengisi *database properties* yang dibutuhkan.

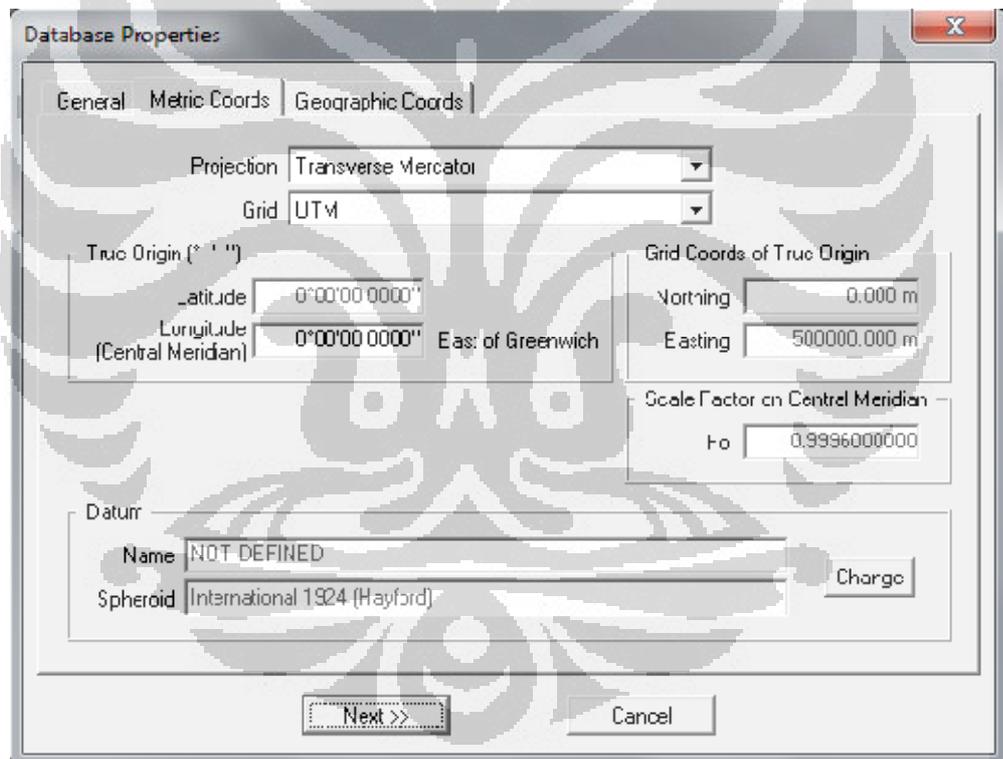


Gambar 3. 29. Kotak dialog 'Database Properties'

Pada menu General, yang dimasukkan adalah :

- **Area Name**, nama area proyek
- **Hemisphere**, yaitu letak daerah penelitian pada bagian bumi (pilihannya **North / South**).
- **XY Coordinat Units**, satuan untuk koordinat lintang dan bujur
- **Elevation Units**, koordinat untuk ketinggian

Jika sudah, selanjutnya mengklik **Next>>**. Pada menu **Metric Coords**, memasukkan datum daerah penelitian. Klik **Change** → pilih datum yang diinginkan → **OK** → **Next >>**



Gambar 3. 30. Kotak dialog 'Metric Coords'.

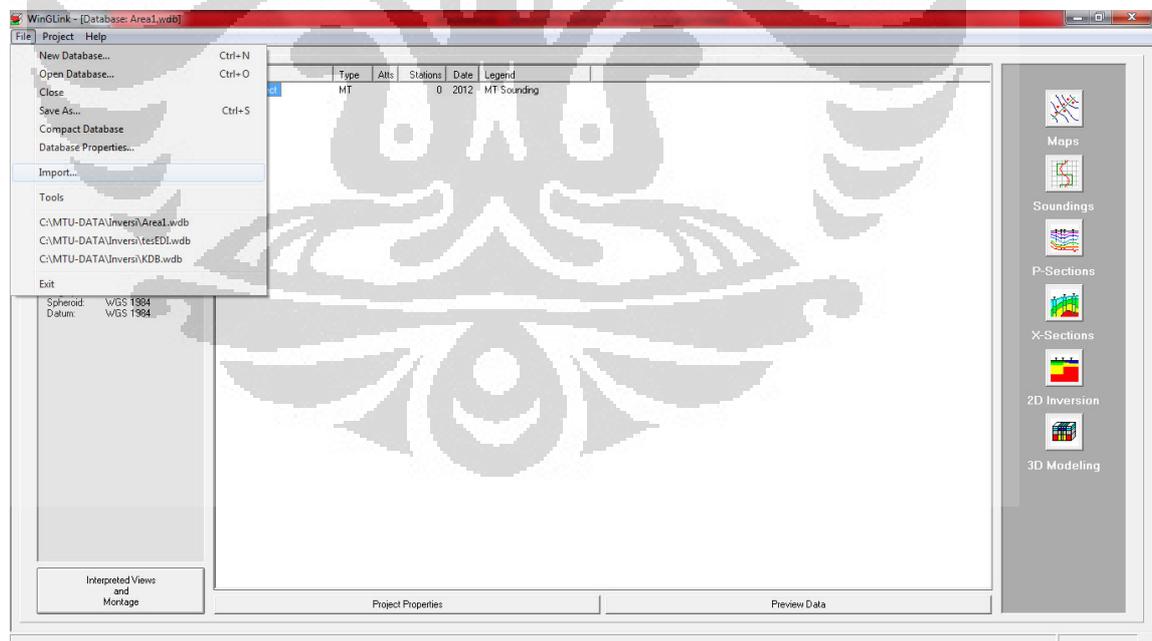
Untuk selanjutnya, pada menu **Geographic Coords**, lakukan prosedur yang sama.

3. Selanjutnya, membuat *Project* baru dengan mengklik menu **Project** → **New** → **Single** dan lengkapi data pada **Project properties**.



Gambar 3.31. Tampilan menu Project.

4. Selanjutnya, **Import Data** dengan mengklik **File → Import**. Pilih data dari **External file → In an Existing Project** → pilih nama project → **Next>>**.



Gambar 3.32. Tampilan menu **File → Import**.

Selanjutnya import data '.dts' yang telah dibuat dari data hasil dari pengolahan di MATLAB dan data koordinat yang kita miliki.

5. Kemudian, membuat profile dengan kembali ke menu utama dan mengklik ikon **Maps** → **Open**. Selanjutnya adalah notifikasi untuk gridding, kita dapat membuat gridding sendiri, tetapi juga dapat membuat grid sesuai default parameter, dengan cara check list **grid using default parameters** lalu **OK**.
6. Buat profile dengan mengklik **Profile** → **Add Profile Trace** → klik pada ujung lintasan ujung yang diinginkan → **OK**.
7. Pilih menu **Mouse Selection** untuk memilih stasiun yang diinginkan, simpan dengan mengklik **File** → **Save**.
8. Melakukan proses inversi dengan mengklik ikon **2D inversion** → pilih lintasan → **OK**. Lalu pada menu **Inversion** pilih **Run Smooth Inversion**.

3.5 Inversi menggunakan MT2Dinv

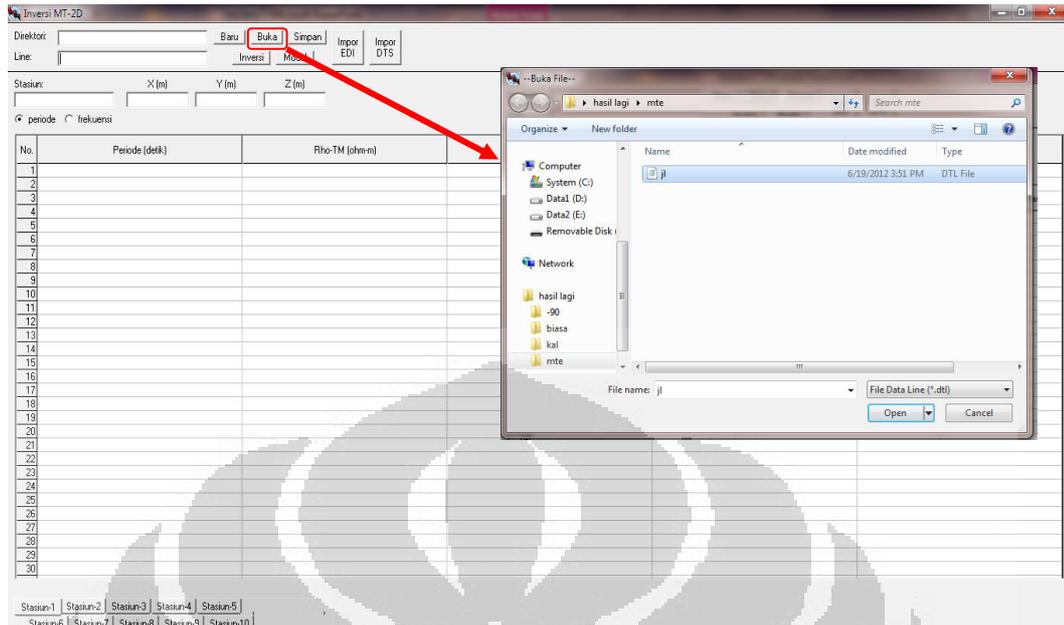
Proses inversi juga dilakukan dengan menggunakan program MT2Dinv yang juga merupakan *software* dari dalam negeri. Input data di isoftware ini sama dengan di WinGLink, namun ditambah dengan data koordinat lintasan yang diberi ekstensi file .dtl. Berikut langkah-langkah inversi menggunakan MT2Dinv :

1. Membuka program MT2Dinv



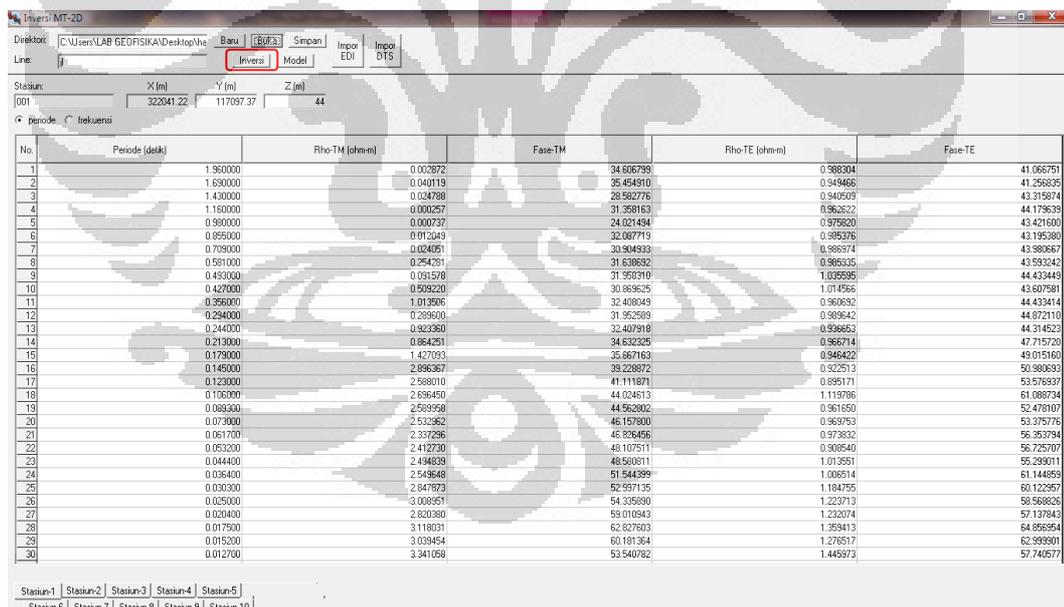
Gambar 3.33 Tampilan awal MT2Dinv

2. Mengimpor data dengan menekan ikon **buka**, lalu memasukkan file .dtl.



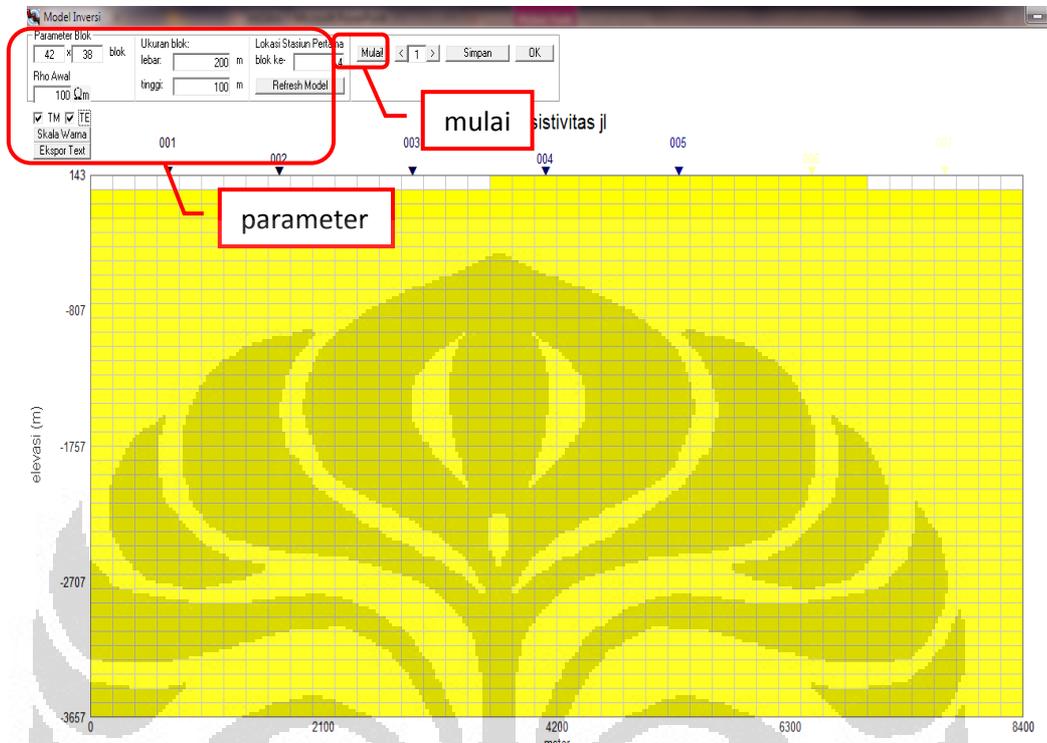
Gambar 3. 34 Tampilan ikon **buka** dan impor file.

3. Setelah memasukkan data, selanjutnya dilakukan proses inversi dengan menekan ikon **inversi**.



Gambar 3.35 Tampilan ikon **Inversi**.

4. Untuk melakukan inversi, perlu melakukan pengaturan parameter inversinya terlebih dahulu. Setelah itu, tekan **mulai** untuk memulai inversi.



Gambar 3. 36 Tampilan pengaturan parameter dan proses inversi.

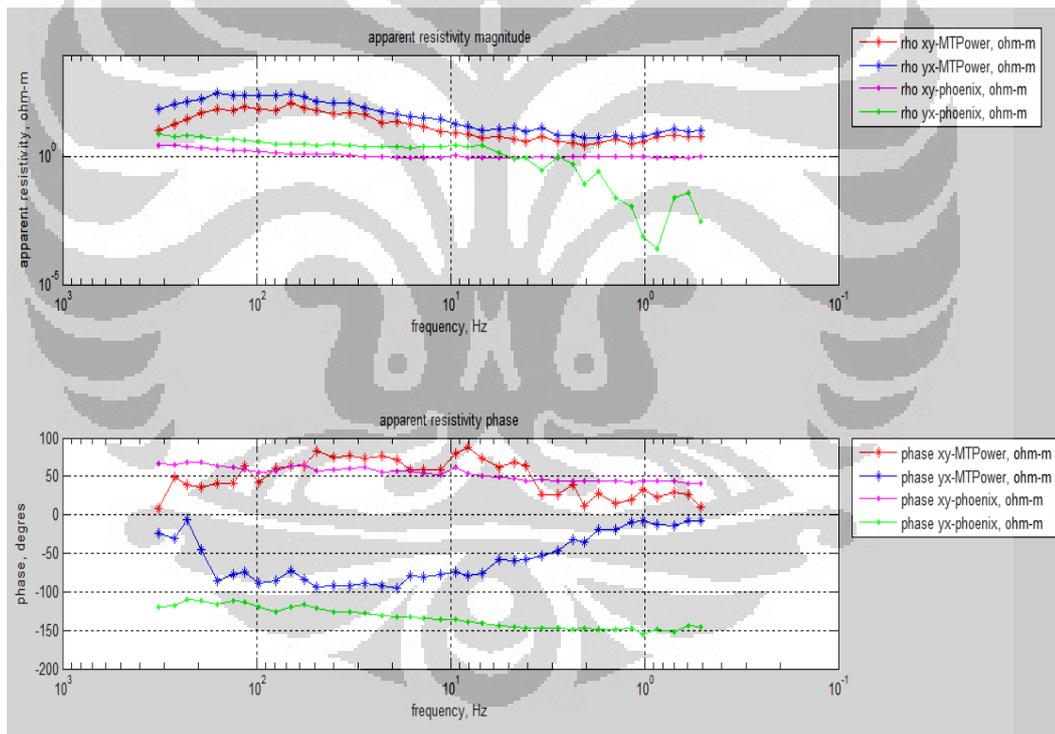
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

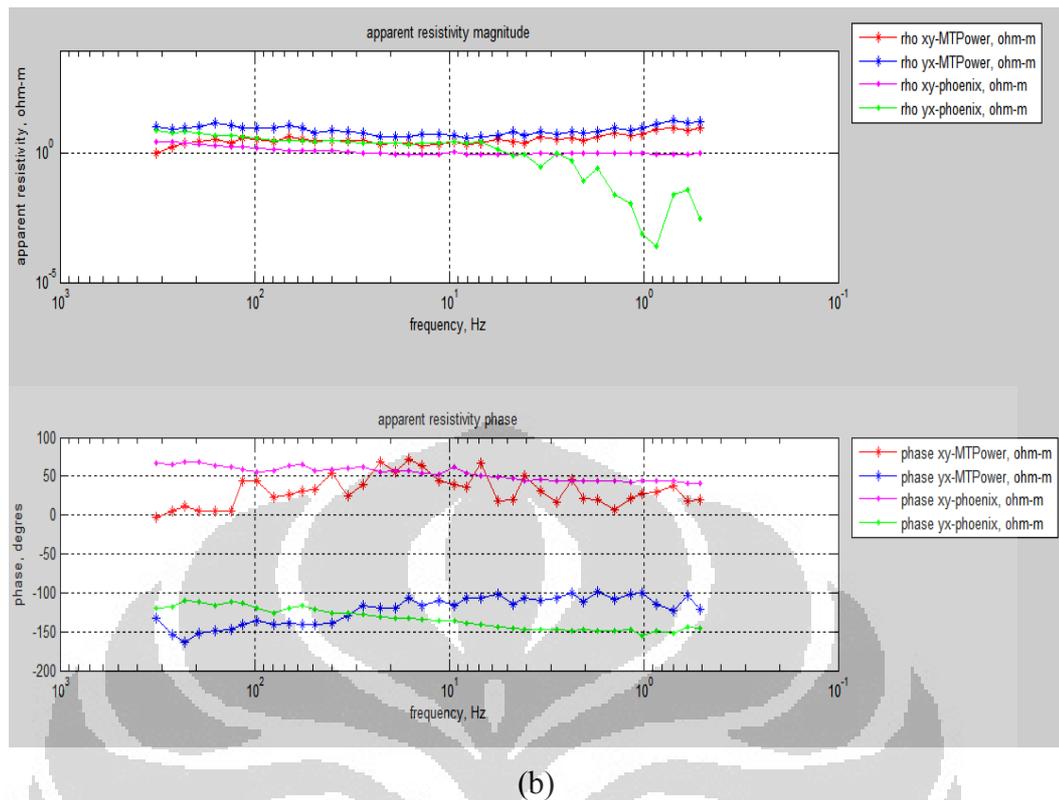
4.1 Hasil Pengolahan dengan menggunakan MTPower

Pengolahan data ini dilakukan terhadap 7 titik pada suatu lintasan pengukuran di lapangan X. Pada subbab ini, penulis akan menampilkan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi dari ketujuh titik tersebut untuk pengolahan sebelum dilakukan kalibrasi dan sesudah dilakukan kalibrasi yang telah dibandingkan dengan data hasil pengolahan dengan menggunakan SSMT.

1. Titik 001



(a)



(b)
Gambar 4.1. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 001 (a) sebelum dikalibrasi, dan (b) sesudah dikalibrasi

Gambar 4.1 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 001 yang belum dikalibrasi. Di sini terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE sudah terlihat adanya tren yang lurus. Pada kurva fase TM sudah terlihat ada tren, tetapi di bagian ujung frekuensi tinggi dan rendah nilai fasenya naik, sehingga terlihat seperti menutup pada kedua ujungnya.

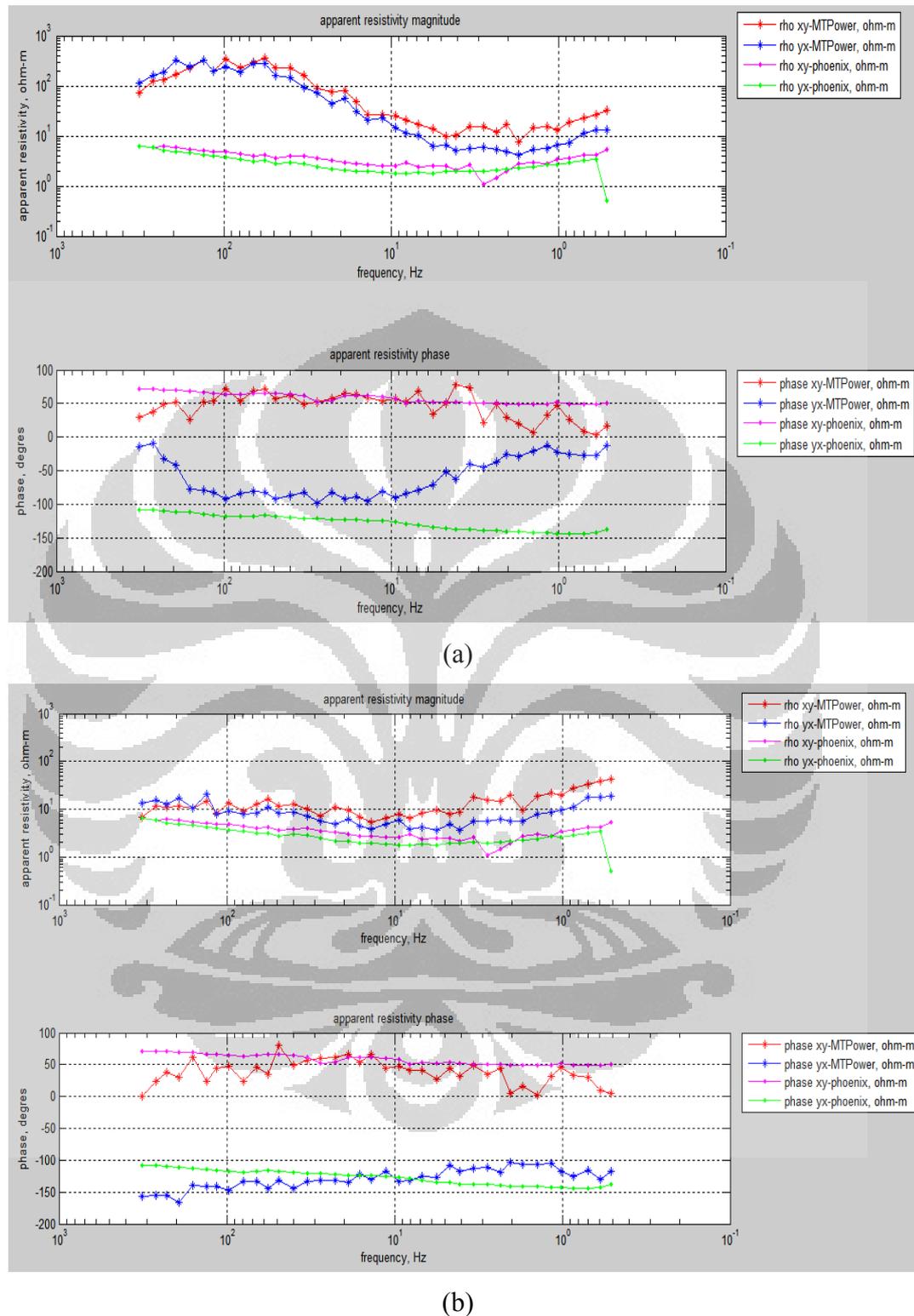
Gambar 4.1 (b) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 001 yang telah dilakukan proses kalibrasi. Di sini terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, hingga dua dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak berubah secara signifikan dan cenderung mirip. Sehingga kurva resistivitas semu yang terbentuk menjadi lurus. Untuk kurva fase, setelah dikalibrasi kedua ujungnya (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah) terbuka dan terbentuk tren yang cenderung lurus. Secara keseluruhan, kurva resistivitas semu dan fase untuk

pengolahan data menggunakan MATLAB hasilnya dapat dikategorikan sebagai data yang *'excellent'*.

Apabila dibandingkan dengan kurva resistivitas semu dan fase yang dihasilkan dari pengolahan data dengan menggunakan SSMT, untuk kurva resistivitas TE-nya cenderung mirip, sedangkan resistivitas TM-nya agak berbeda. Untuk kurva resistivitas TM pada frekuensi rendah, hasil pengolahan dengan menggunakan MATLAB hasilnya mengikuti tren dan cenderung lurus. Sedangkan hasil pengolahan dengan menggunakan SSMT pada frekuensi rendah trennya kacau dan nilainya sangat kecil, hingga mencapai orde 0.0001. Untuk fase TE dan TM hasil pengolahan data dengan menggunakan MATLAB, apabila dibandingkan dengan hasil dari pengolahan data menggunakan SSMT agak kurang bagus. Kurvanya masih belum begitu lurus, namun sudah terlihat adanya tren untuk kedua kurva fase tersebut.

Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 1239.93% menjadi 436.63% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 407.63% menjadi 146.52% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi naik dari 8.29% menjadi 42.17% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 9.19% menjadi 8.69% setelah dikalibrasi.

2. Titik 002



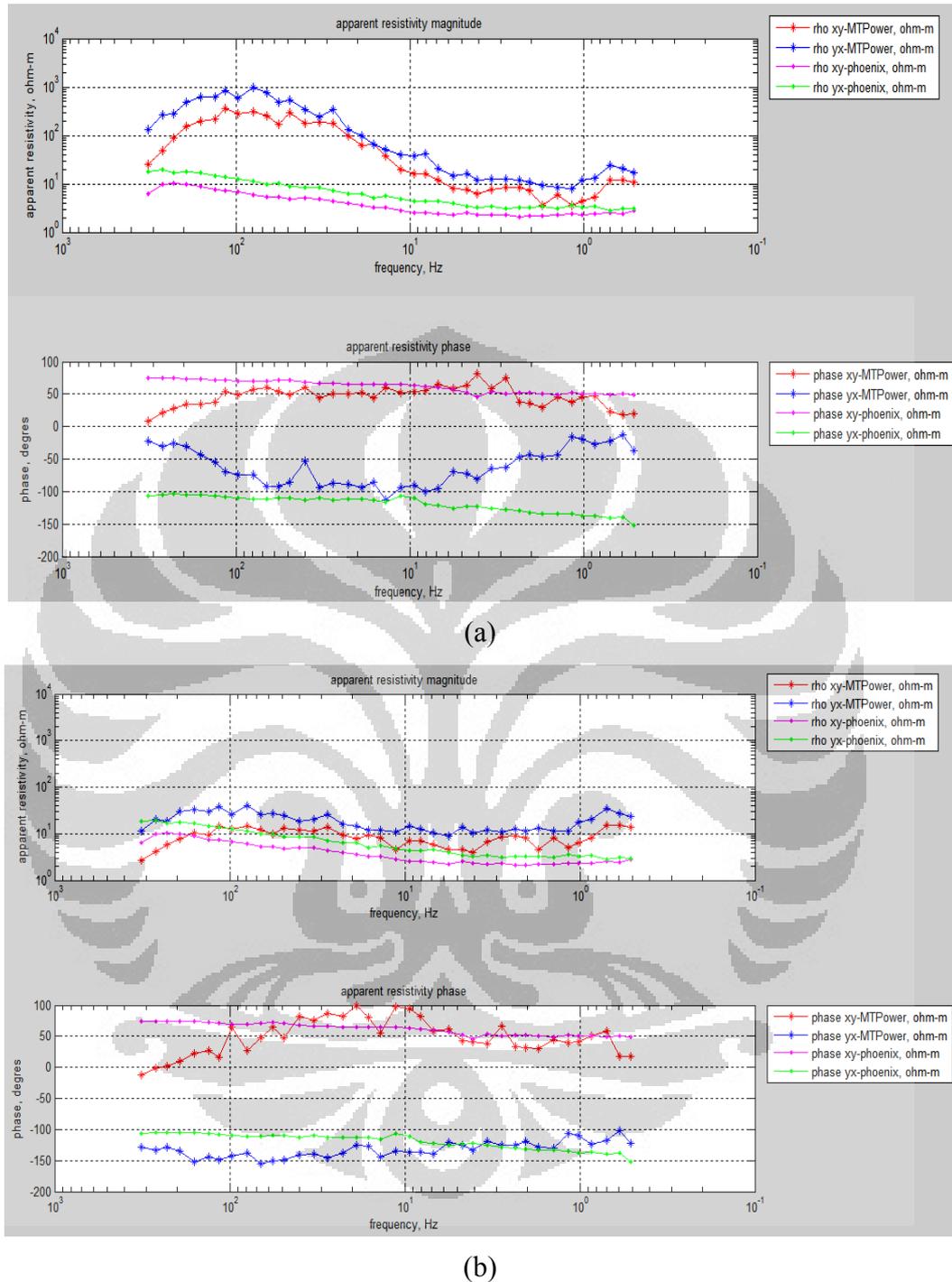
Gambar 4.2. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 002 (a) sebelum dikalibrasi, (b) sesudah dikalibrasi.

Gambar 4.2 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 002 yang belum dikalibrasi. Seperti pada Gambar 4.1 (a), di sini juga terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE dan TM sudah terlihat adanya tren, hanya saja untuk yang TE trennya cenderung lurus, untuk yang TM melengkung dari tinggi, rendah ke tinggi lagi. Di sini, dapat dilihat pula bahwa kurva fase TE dan TM menutup di kedua ujung (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah).

Pada Gambar 4.2 (b), yang merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 002 yang telah dikalibrasi, terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, hingga dua dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak terlalu signifikan dan cenderung mirip. Untuk kurva fase TE dan TM, berubah dan menjadi lebih lurus dan ujungnya menjadi terbuka. Ini sama dengan hasil pengolahan dari titik 001.

Apabila dibandingkan dengan hasil pengolahan dengan menggunakan SSMT, kurva resistivitas semu TE dan TM-nya memang tidak selurus hasil pengolahan dengan SSMT. Namun, pada frekuensi rendah, kurva TM-nya lebih mengikuti tren. Sedangkan untuk kurva fasenya, agak kurang lurus seperti pada hasil pengolahan dengan SSMT, namun sudah terlihat adanya tren. Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 256.85% menjadi 105.54% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 326.63% menjadi 106.99% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi naik dari 20.20% menjadi 33.70% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 16.99% menjadi 1.28% setelah dikalibrasi.

3. Titik 003



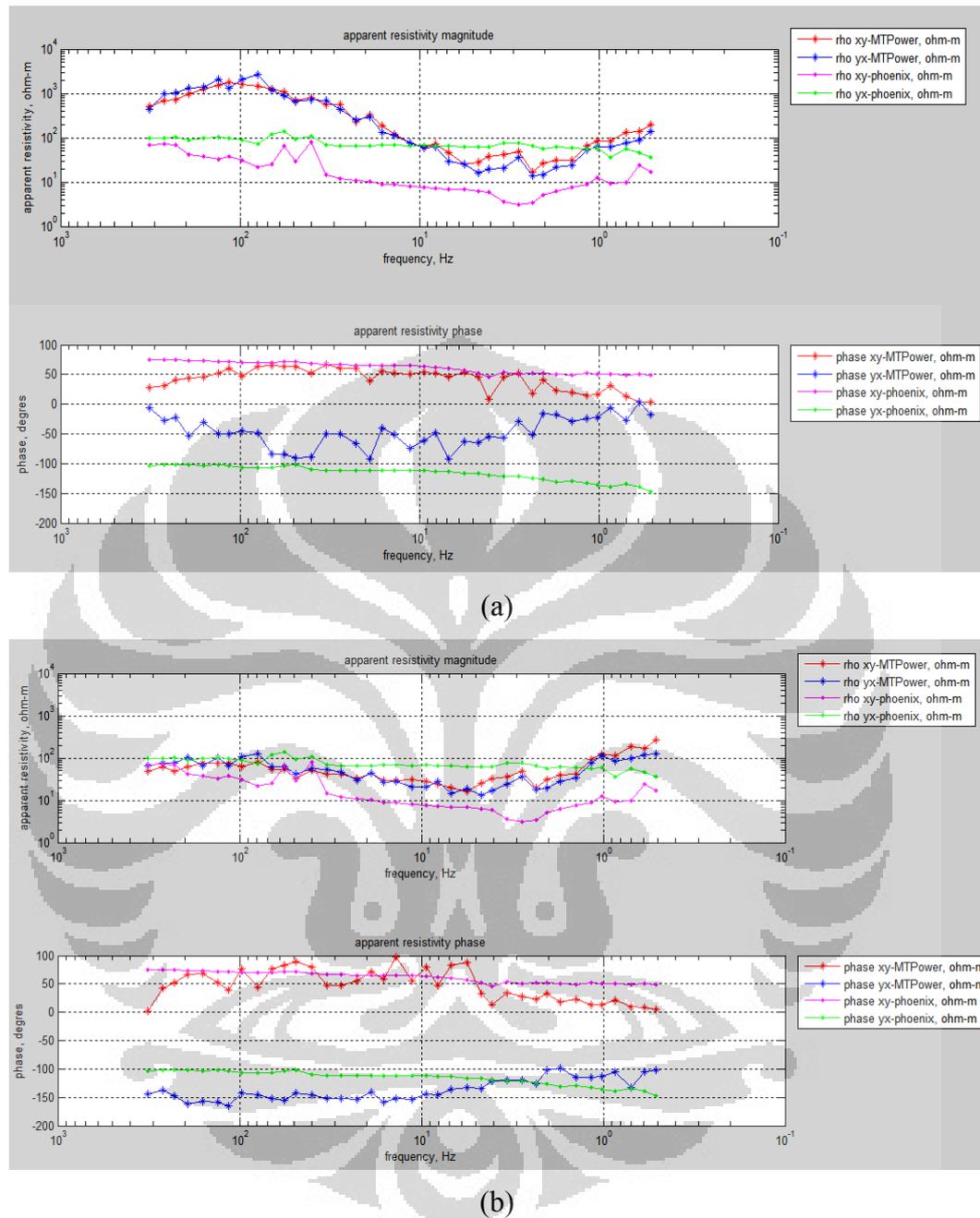
Gambar 4.3. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 003 (a) sebelum dikalibrasi, (b) sesudah dikalibrasi.

Gambar 4.3 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 003 yang belum dikalibrasi. Seperti pada Gambar 4.1 (a) dan 4.2 (a), di sini juga terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE sudah terlihat adanya tren, namun pada kurva fase TM masih cenderung berantakan. Di sini, dapat dilihat pula bahwa kurva fase TE dan TM terlihat seperti menutup di kedua ujung (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah).

Pada Gambar 4.3 (b), yang merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 003 yang telah dikalibrasi, terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, hingga dua dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak terlalu signifikan dan cenderung mirip. Untuk kurva fase TE, berubah dan menjadi lebih berantakan, sedangkan kurva fase TM cenderung lurus. Ini mirip dengan Gambar 4.1 (b) dan 4.2 (b)

Apabila dibandingkan, hasil pengolahan data dengan menggunakan MATLAB memang tren untuk resistivitas semu TE dan TM serta fase TE dan TM-nya tidak sebagus tren dari hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT, namun trennya masih dapat terlihat. Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 209.40% menjadi 50.17% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 166.92% menjadi 46.84% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 25.09% menjadi 22.33% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 27.38% menjadi 10.81% setelah dikalibrasi.

4. Titik 004



Gambar 4.4. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 004 (a) sebelum dikalibrasi, (b) sesudah dikalibrasi

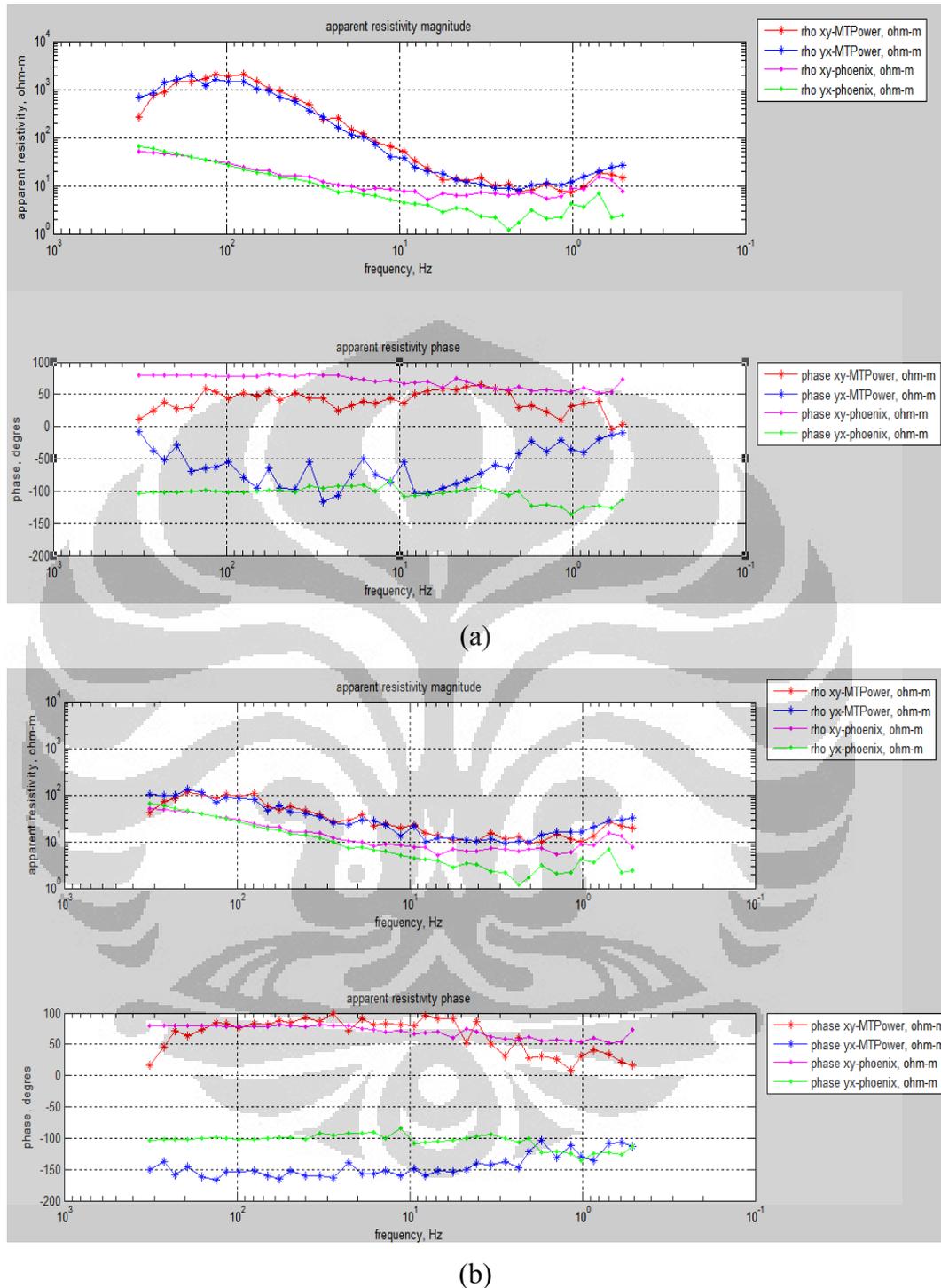
Gambar 4.4 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 004 yang belum dikalibrasi. Seperti pada hasil sebelumnya, di sini juga terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung

tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE sudah terlihat adanya tren yang jelas, namun pada kurva fase TM masih cenderung berantakan. Di sini, dapat dilihat pula bahwa kurva fase TE dan TM menutup di kedua ujung (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah).

Pada Gambar 4.4 (b), yang merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 004 yang telah dikalibrasi, terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, hingga dua dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak terlalu signifikan dan cenderung mirip. Hasil ini sama dengan hasil untuk titik-titik sebelumnya.

Apabila dibandingkan, hasil dari pengolahan data dengan menggunakan MATLAB ini kurvanya (resistivitas TE, resistivitas TM, fase TE, fase TM) memang tidak selurus kurva hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT. Namun untuk kurva resistivitas, walaupun agak naik-turun, tetapi tidak sebesar naik-turunnya kurva hasil SSMT. Sedangkan untuk kurva fase hasilnya masih kurang rapi (nilainya masih naik-turun), tetapi sudah terlihat adanya tren. Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 98.65% menjadi 33.50% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 44.48% menjadi 6.67% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi naik dari 32.50% menjadi 184.27% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 18.04% menjadi 17.65% setelah dikalibrasi.

5. Titik 005



Gambar 4.5. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 005 (a) sebelum dikalibrasi, (b) sesudah dikalibrasi

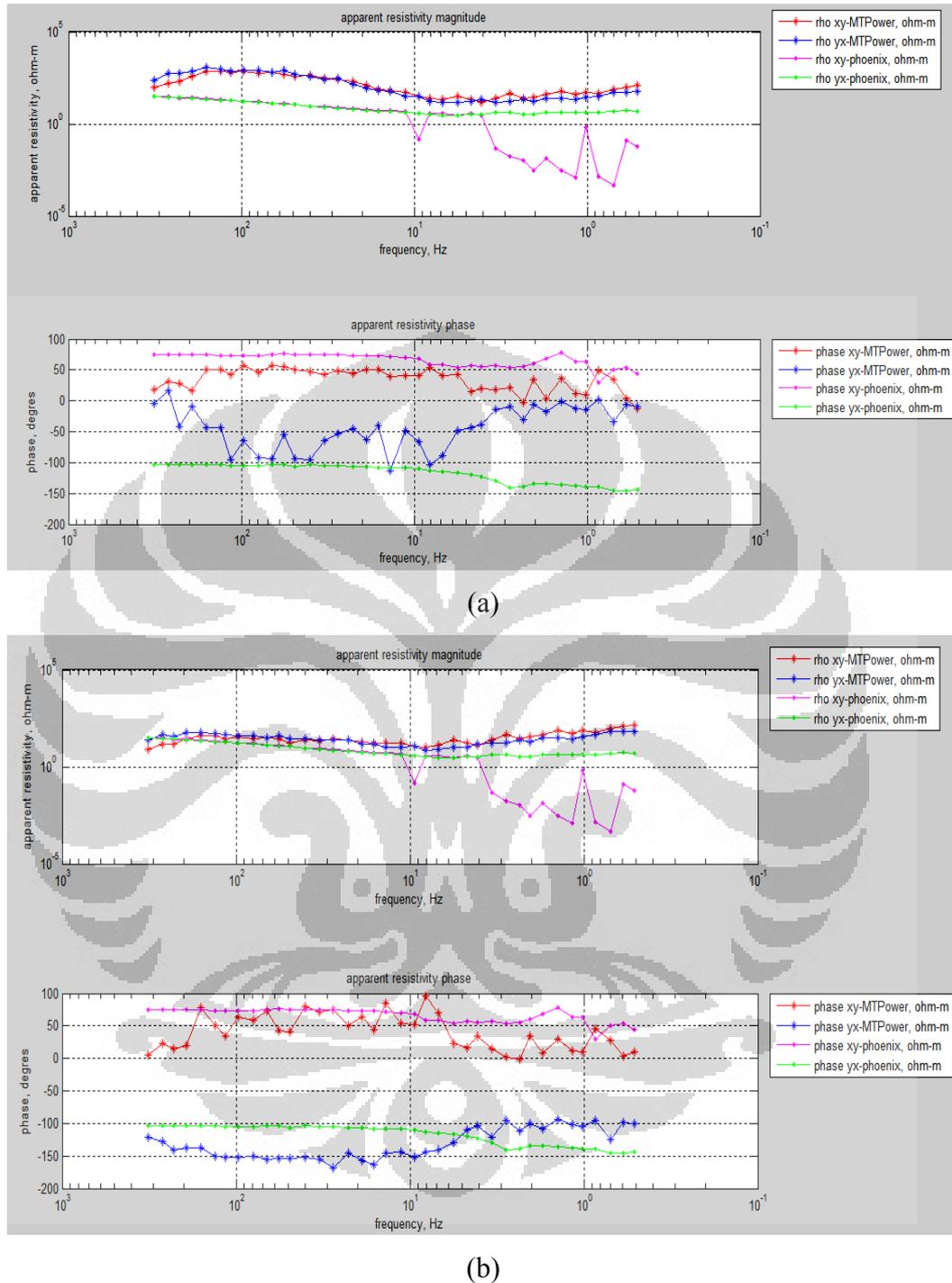
Gambar 4.5 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 005 yang belum dikalibrasi. Seperti pada hasil

sebelumnya, di sini juga terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren yang jelas melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE sudah terlihat adanya tren, namun pada kurva fase TM masih sangat berantakan. Di sini, dapat dilihat pula bahwa kurva fase TE dan TM menutup di kedua ujung (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah).

Pada Gambar 4.5 (b), yang merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 005 yang telah dikalibrasi, terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, sebesar satu dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak terlalu signifikan dan cenderung mirip. Hasil ini sama dengan hasil untuk titik-titik sebelumnya.

Apabila dibandingkan, hasil dari pengolahan data dengan menggunakan MATLAB ini kurva resistivitas TE dan TM-nya lebih lurus dari pada kurva hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT. Namun untuk kurva fase TE dan TM, walaupun agak sedikit naik-turun, sudah terlihat adanya tren dan di kedua ujungnya (frekuensi rendah dan tinggi) menjadi terbuka. Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 119.41% menjadi 29.71% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 128.60% menjadi 38.33% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 43.84% menjadi 9.43% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 44.89% menjadi 38.30% setelah dikalibrasi.

6. Titik 006



Gambar 4.6. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 006 (a) sebelum dikalibrasi, (b) sesudah dikalibrasi

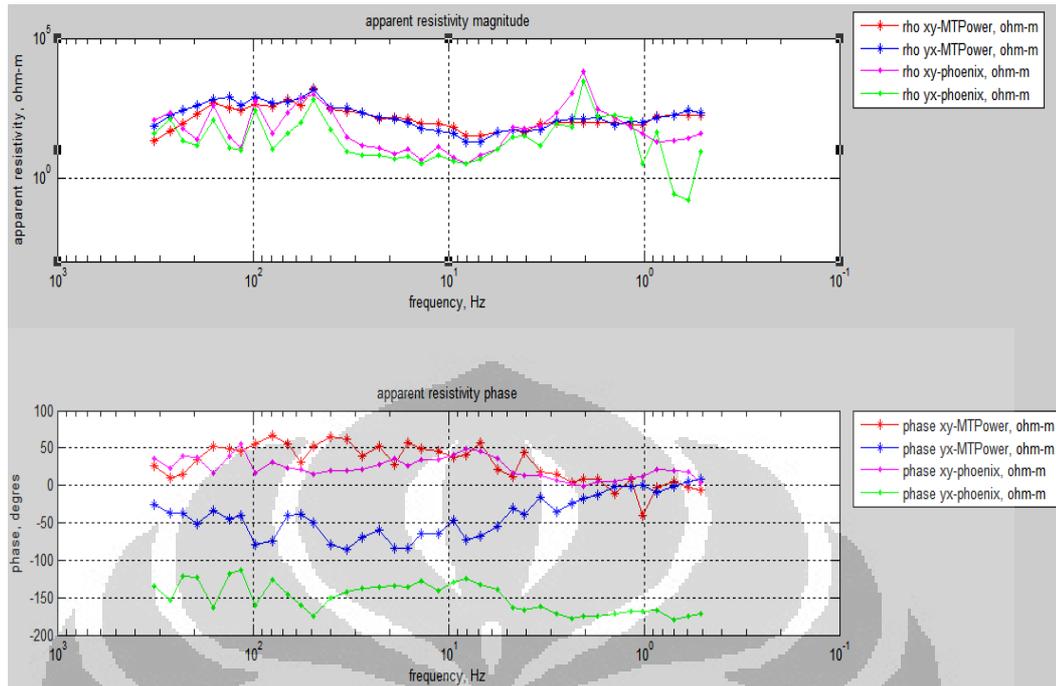
Gambar 4.6 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 006 yang belum dikalibrasi. Seperti pada hasil

sebelumnya, di sini juga terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren yang jelas melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE sudah terlihat adanya tren, namun pada kurva fase TM masih sangat berantakan. Di sini, dapat dilihat pula bahwa kurva fase TE dan TM menutup di kedua ujung (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah).

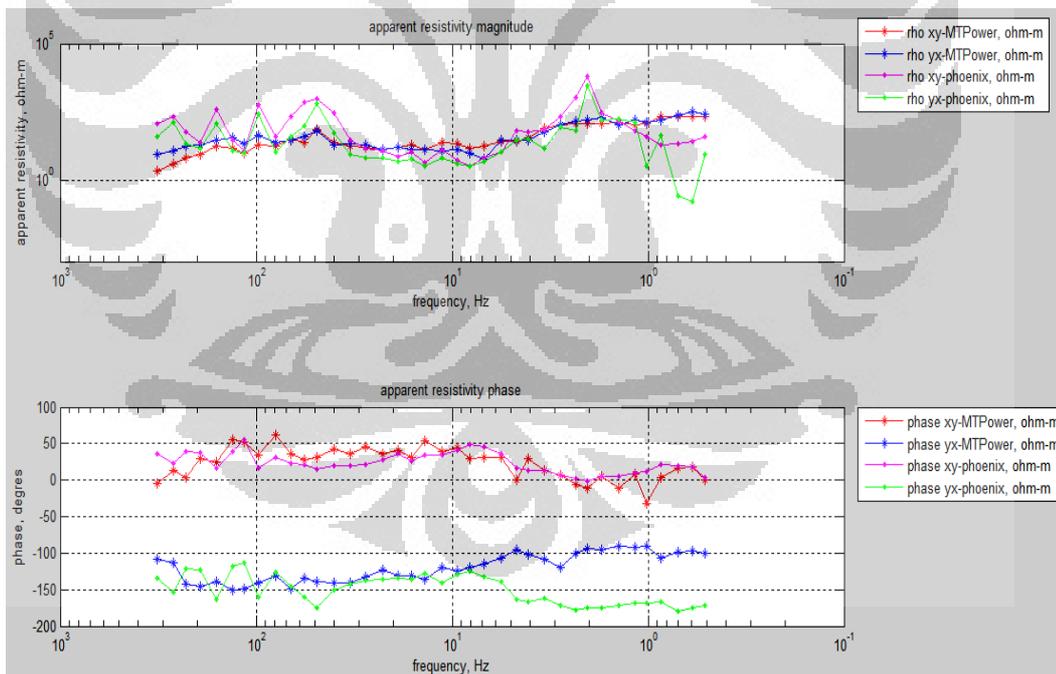
Pada Gambar 4.6 (b), yang merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 006 yang telah dikalibrasi, terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, sebesar dua dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak terlalu signifikan dan cenderung mirip. Hasil ini sama dengan hasil untuk titik-titik sebelumnya.

Apabila dibandingkan, hasil dari pengolahan data dengan menggunakan MATLAB ini kurva resistivitas TE dan TM-nya lebih lurus dari pada kurva hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT. Apalagi kurva TE dari hasil SSMT untuk frekuensi rendah nilainya sangat kecil dan kurvanya tidak beraturan. Namun untuk kurva fase TE dan TM, walaupun agak sedikit naik-turun, sudah terlihat adanya tren dan di kedua ujungnya (frekuensi rendah dan tinggi) menjadi terbuka. Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 150.49% menjadi 67.43% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 149.94% menjadi 52.03% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 48.66% menjadi 39.69% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 14.33% menjadi 12.06% setelah dikalibrasi.

7. Titik 007



(a)



(b)

Gambar 4.7. Kurva resistivitas dan fase vs frekuensi untuk titik 007 (a) sebelum dikalibrasi, (b) sesudah dikalibrasi

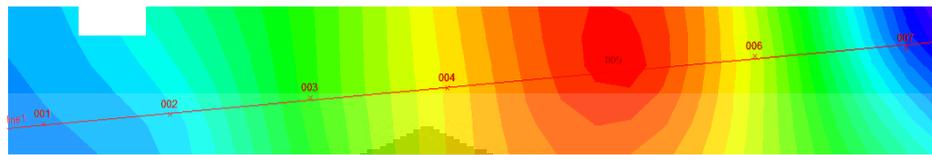
Gambar 4.7 (a) merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 007 yang belum dikalibrasi. Seperti pada hasil sebelumnya, di sini juga terlihat kurva resistivitas, baik TE maupun TM mempunyai tren yang jelas melengkung yang pada frekuensi tinggi nilainya cenderung tinggi dan kemudian turun. Sedangkan kurva fasenya, untuk TE sudah terlihat adanya tren, namun pada kurva fase TM masih sangat berantakan. Di sini, dapat dilihat pula bahwa kurva fase TE dan TM menutup di kedua ujung (frekuensi tinggi dan frekuensi rendah).

Pada Gambar 4.7 (b), yang merupakan kurva resistivitas semu vs frekuensi dan kurva fase vs frekuensi untuk titik 007 yang telah dikalibrasi, terlihat bahwa nilai resistivitas semu pada frekuensi tinggi turun secara signifikan, sebesar dua dekade. Sedangkan untuk frekuensi rendah, nilai resistivitasnya tidak terlalu signifikan dan cenderung mirip. Hasil ini sama dengan hasil untuk titik-titik sebelumnya.

Apabila dibandingkan, hasil dari pengolahan data dengan menggunakan MATLAB ini kurva resistivitas TE dan TM-nya jauh lebih lurus dan trennya jauh terlihat lebih jelas dari pada kurva hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT. Kurva TE dan TM dari hasil SSMT tidak beraturan dan trennya tidak terlihat jelas. Namun untuk kurva fase TE dan TM, sama dengan kurva fase untuk SSMT, agak sedikit naik-turun, sudah terlihat adanya tren dan di kedua ujungnya (frekuensi rendah dan tinggi) menjadi terbuka. Kesalahan referensinya sendiri, untuk resistivitas TE dari sebelum dikalibrasi naik dari 8.32% menjadi 29.89% setelah dikalibrasi. Untuk resistivitas TM dari sebelum dikalibrasi turun dari 14.14% menjadi 13.40% setelah dikalibrasi. Untuk fase TE dari sebelum dikalibrasi turun dari 24.38% menjadi 2.67% setelah dikalibrasi. Untuk fase TM dari sebelum dikalibrasi naik dari 12.86% menjadi 20.34% setelah dikalibrasi.

4.2 Hasil Inversi 2D dengan Menggunakan WinGLink

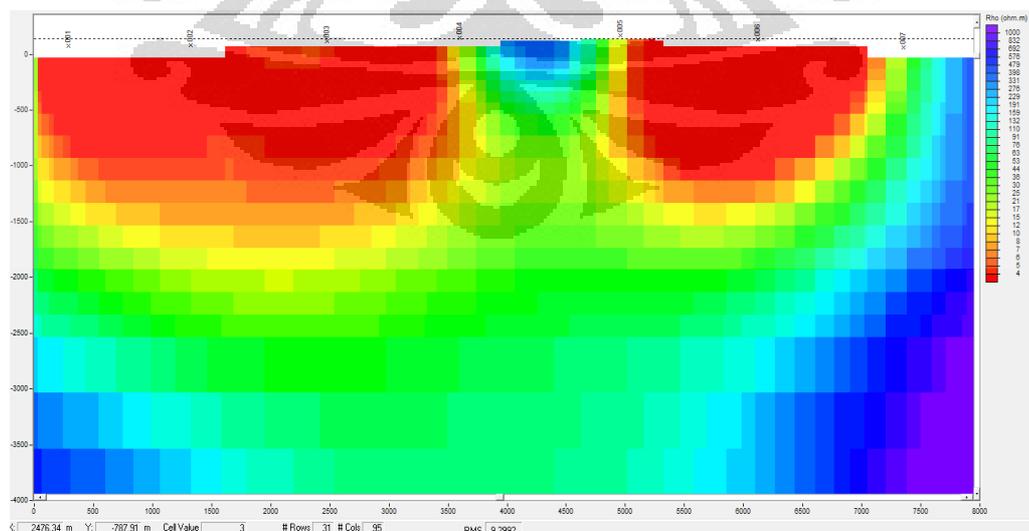
Dari hasil pengolahan data dengan menggunakan MATLAB di atas, dilakukan inversi untuk setiap perlakuan, yaitu tanpa kalibrasi dan dengan kalibrasi, yang selanjutnya akan dibandingkan dengan hasil inversi dari hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT.



Gambar 4.8. Lintasan inversi

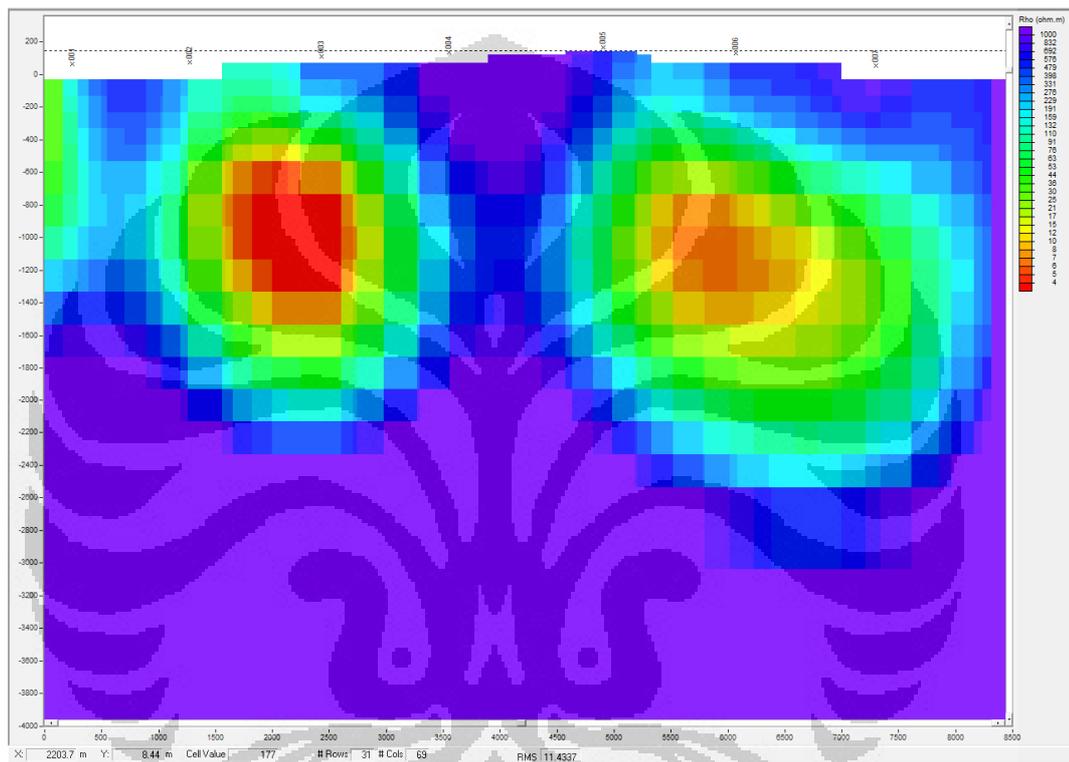
Gambar 4.8 adalah gambar lintasan inversi yang digunakan. Dari gambar tersebut dapat dilihat posisi dari ketujuh titik yang diinversi yaitu berturut-turut dari kiri titik 001, titik 002, titik 003, titik 004, titik 005, titik 006, dan titik 007. Gradasi warna menunjukkan elevasi dari masing-masing titik, dimana warna biru merupakan daerah elevasi rendah dan merah merupakan daerah elevasi tinggi. Dari sini dapat kita lihat bahwa titik 005 berada di daerah dengan elevasi paling tinggi.

Sebagai pembanding, di sini ditampilkan hasil inversi dari pengolahan dengan menggunakan SSMT terlebih dahulu.



Gambar 4.9. Hasil inversi untuk hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT

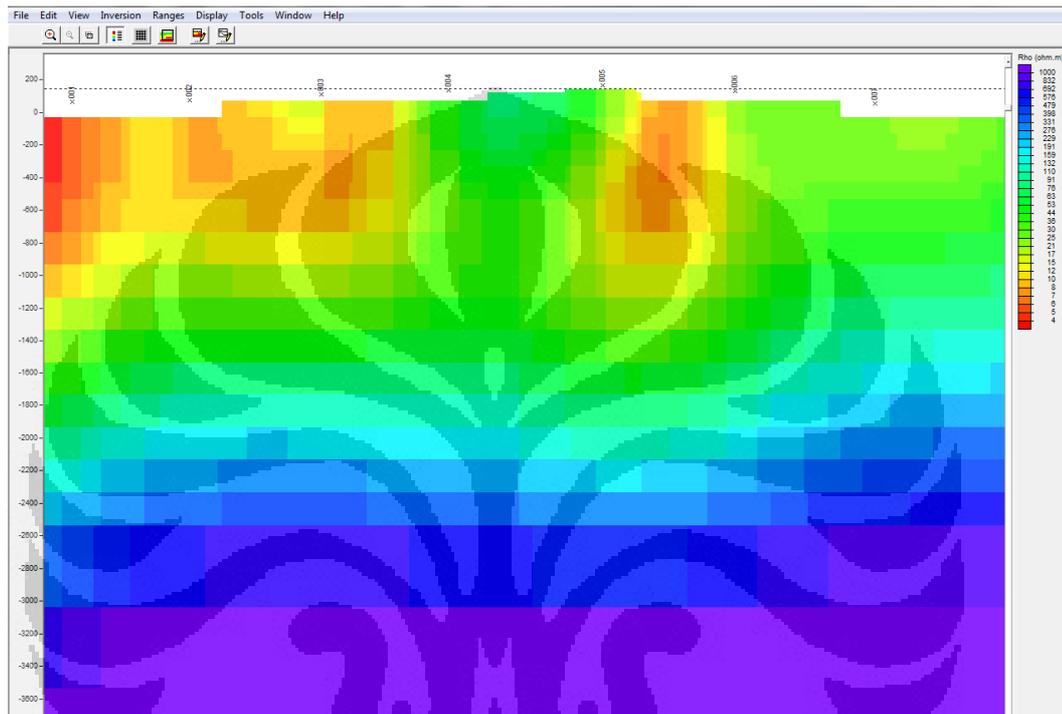
Dari gambar di atas, terlihat bahwa terdapat resistivitas yang rendah di dekat permukaan sampai pada kedalaman 1500 meter, namun terpotong di antara titik 004 dan titik 005. Pada kedalaman di atas 1500 meter, tampak adanya resistivitas tinggi di kanan dan kiri lintasan. Untuk inversi ini, RMS error yang diperoleh cukup kecil, yaitu 9.29%.



Gambar 4.10. Hasil inversi untuk perlakuan ‘tanpa kalibrasi’ pada pengolahan data dengan MATLAB.

Gambar 4.10 merupakan hasil inversi dari pengolahan data dengan MATLAB yang tidak memperhitungkan faktor kalibrasi. Di sini terlihat adanya resistivitas tinggi mulai dari kedalaman 2000 meter, dan beberapa di permukaan. Sedangkan di kedalaman sampai 200m meter terdapat beberapa daerah resistivitas rendah yang terpisah pisah. RMS error yang dari perhitungan inversi ini adalah 11.43%.

Apabila dibandingkan dengan hasil inversi pada Gambar 4.09, hasil ini jauh berbeda. Persebaran resistivitas rendahnya tidak mencapai permukaan. Dan resistivitas tinggi bahkan mencapai permukaan. Hal yang mirip di sini adalah adanya ketidakterusan resistivitas rendah pada daerah antara titik 004 dan titik 005.



Gambar 4.11. Hasil inversi untuk perlakuan 'dengan kalibrasi' pada pengolahan data dengan menggunakan MATLAB.

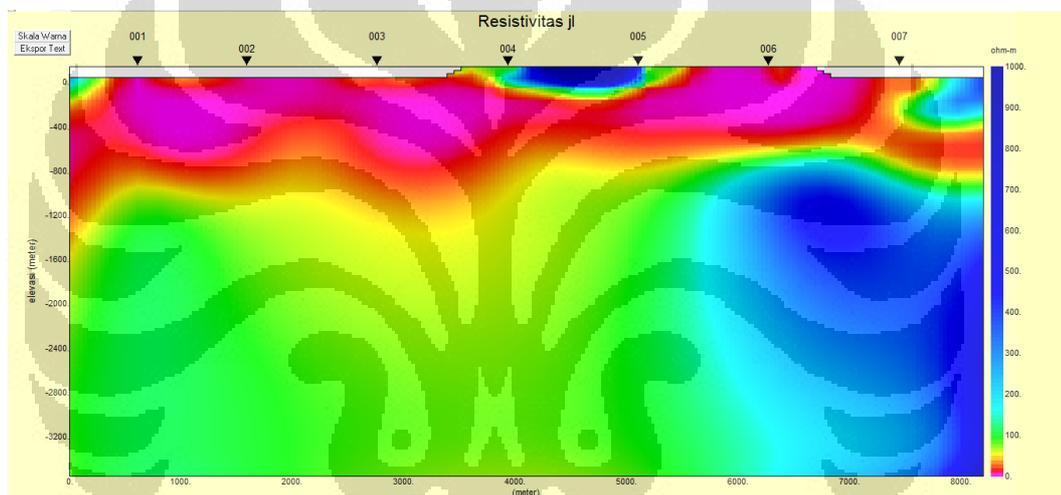
Gambar 4.11 merupakan hasil inversi dari pengolahan data dengan MATLAB yang memperhitungkan faktor kalibrasi. Di sini terlihat adanya resistivitas rendah di sepanjang permukaan lintasan inversi hingga kedalaman 1500 meter. Dan di bawahnya, pada kedalaman 2000 meter terdapat resistivitas tinggi. RMS error dari hasil inversi ini adalah 6.09%.

Apabila dibandingkan dengan hasil inversi pada Gambar 4.09, hasil ini cenderung mirip. Adanya persebaran resistivitas rendah dipermukaan dan resistivitas tinggi di kedalaman di atas 2000 meter. Di daerah antara titik 004 dan 005 juga terdapat ketidakterusan daerah resistivitas rendah yang berwarna merah, walaupun nilai resistivitasnya tidak setinggi pada Gambar 4.09. Daerah

dengan resistivitas tinggi pun, pada Gambar 4.11 ini tidak terbelah seperti pada Gambar 4.09. Hasil nversi dari pengolahan data dengan memperhitungkan faktor kalibrasi ini lebih halus dari pada hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT, dan batas antara daerah resistivitas tinggi dan daerah resistivitas rendah lebih terlihat jelas.

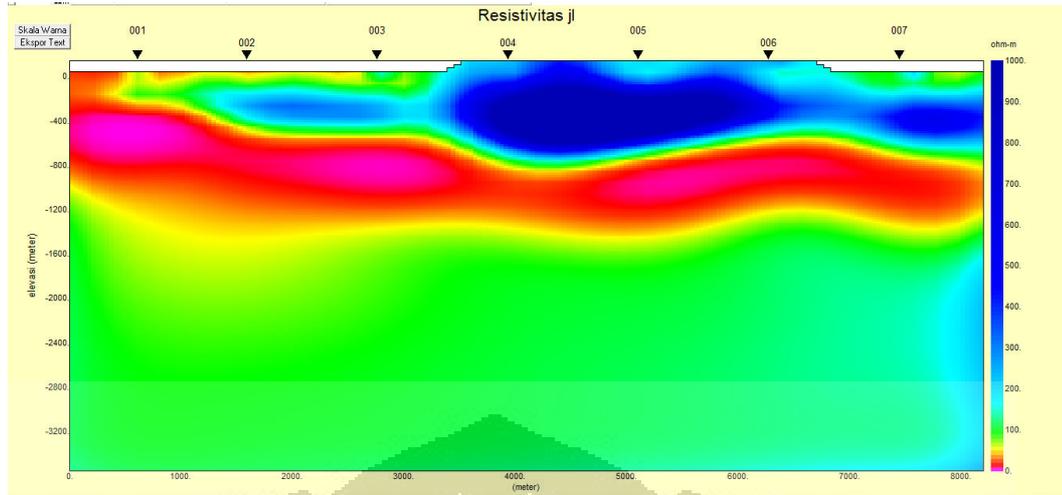
4.3 Hasil Inversi dengan Menggunakan MT2Dinv

Inversi dengan menggunakan MT2Dinv ini dilakukan juga pada data MT yang telah diolah dengan berbagai perlakuan. Adapun hasil inversi 2D untuk hasil pengolahan data dengan menggunakan SSMT2000 adalah sebagai berikut :



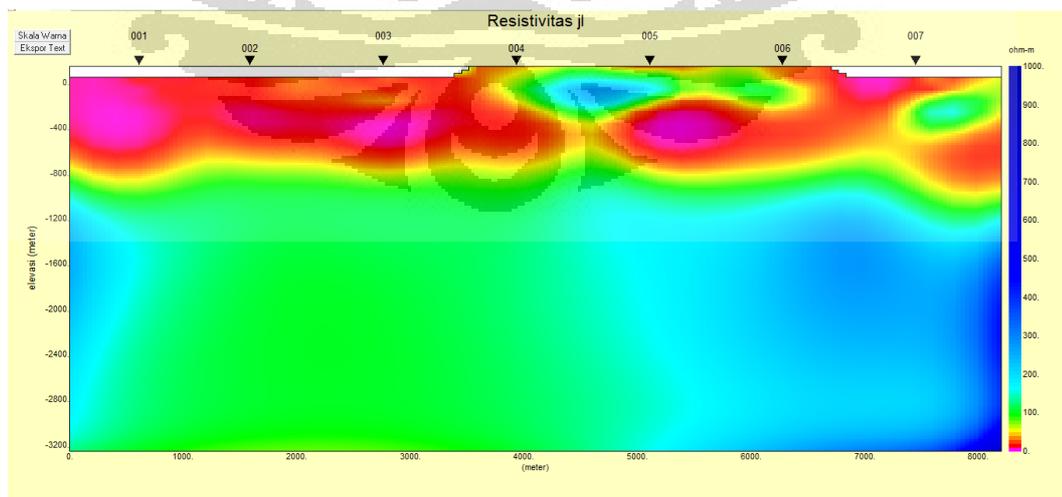
Gambar 4.12 Hasil inversi 2D MT2Dinv pada pengolahan data menggunakan SSMT2000.

Gambar 4.12 merupakan hasil inversi 2D menggunakan MT2Dinv pada pengolahan data dengan menggunakan SSMT2000. Di sini dapat terlihat bahwa di dekat permukaan terdapat persebaran resistivitas rendah (merah) sepanjang lintasan sampai kedalaman 1000 meter. Namun, di antara titik 004 dan titik 005 serta di ujung kanan lintasan terdapat resistivitas tinggi di dekat permukaan. Resistivitas tinggi hanya terdapat di ujung kanan lintasan dan masih terbuka ke sebelah kanan dari mulai kedalaman 1000 meter. Rms error untuk hasil inversi ini adalah sebesar 17%.



Gambar 4.13 Hasil Inversi 2D MT2Dinv pada pengolahan data dengan perlakuan ‘tanpa kalibrasi’ dengan menggunakan MATLAB.

Gambar 4.13 merupakan hasil inversi 2D menggunakan MT2Dinv pada pengolahan data dengan perlakuan ‘tanpa kalibrasi’ dengan menggunakan MATLAB. Di sini dapat terlihat bahwa di dekat permukaan terdapat persebaran resistivitas tinggi sepanjang lintasan dari mulai titik 002 sampai kedalaman 400 meter. Di bawah lapisan dengan resistivitas tinggi ini terdapat lapisan dengan resistivitas rendah sampai dengan kedalaman 1500 meter. Pada lapisan di bawahnya lagi terdapat resistivitas tinggi, namun hanya kecil di ujung lintasan sebelah kanan. Rms error untuk hasil inversi ini adalah sebesar 20%.



Gambar 4.14 Hasil Inversi 2D MT2Dinv pada pengolahan data dengan perlakuan ‘kalibrasi’ dengan menggunakan MATLAB.

Gambar 4.14 merupakan hasil inversi 2D menggunakan MT2Dinv pada pengolahan data dengan perlakuan 'kalibrasi' dengan menggunakan MATLAB. Di sini dapat terlihat bahwa di dekat permukaan terdapat persebaran resistivitas rendah sepanjang lintasan sampai kedalaman 800 meter. Namun, di antara titik 004 dan titik 005 terdapat persebaran resistivitas tinggi. Pada lapisan di bawahnya terdapat resistivitas tinggi di kedua ujung lintasan, di mana yang sebelah kiri kecil dan yang sebelah kanan cukup besar. Rms error untuk hasil inversi ini adalah sebesar 14%.

Apabila dibandingkan dengan hasil inversi pada pengolahan data dengan menggunakan SSMT, hasil inversi pada pengolahan data dengan perlakuan 'kalibrasi'-lah yang lebih mirip. Di mana keduanya terdapat persebaran lapisan resistivitas rendah dekat permukaan, namun ada sedikit resistivitas tinggi dekat permukaan, yaitu di antara titik 004 dan 005. Keduanya juga mempunyai lapisan resistivitas tinggi yang cukup besar di bawah lapisan resistivitas rendah sebelah kanan lintasan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu :

1. Ada beberapa tahapan yang perlu dilakukan dalam melakukan proses pengolahan data *time series*, seperti :
 - Proses transformasi Fourier dengan teknik *Fast Fourier Transform* (FFT) yang bertujuan untuk mentransformasi data dari domain waktu menjadi domain frekuensi.
 - Setelah data berada dalam domain frekuensi, selanjutnya kita mengevaluasi atau memilih frekuensi dengan jumlah lebih dari 6 frekuensi *per decade* yang nantinya akan diproses pada tahapan selanjutnya.
 - Kemudian dilakukan teknik robust yang tujuannya adalah untuk menemukan tren data yang paling dominan.
 - Setelah itu dapat dilakukan perhitungan nilai impedansi.
 - Setelah diperoleh nilai impedansi, maka dapat dihitung resistivitas semu dan fase dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada literatur yang ada.
2. Proses kalibrasi yang dilakukan pada pengolahan data MT terdiri dari beberapa tahap, yaitu :
 - Perhitungan kalibrasi boks yang berupa bilangan kompleks yang menyatakan nilai kalibrasi dan derajat yang nilainya berubah terhadap waktu dan dihitung pada saat setelah dilakukan FFT .
 - Perhitungan kalibrasi sensor yang bergantung pada jenis sensor yang digunakan (bisa berupa nilai kalibrasi yang berubah terhadap waktu untuk sensor magnetik berupa koil induksi atau pun tetap untuk sensor magnetik berupa *fluxgate magnetometer*) yang dihitung pada tahap setelah FFT.
 - Perhitungan kalibrasi *A/D Converter (least count)* yang dapat dihitung di tahap mana saja.
3. Hasil dari perhitungan kalibrasi dapat mengubah data MT mentah menjadi data MT yang lebih bagus dengan tren dan nilai yang lebih mendekati keadaan sebenarnya. Kesalahan relatif rata-rata turun sebesar 51.57% untuk resistivitas TE, 53.67% untuk

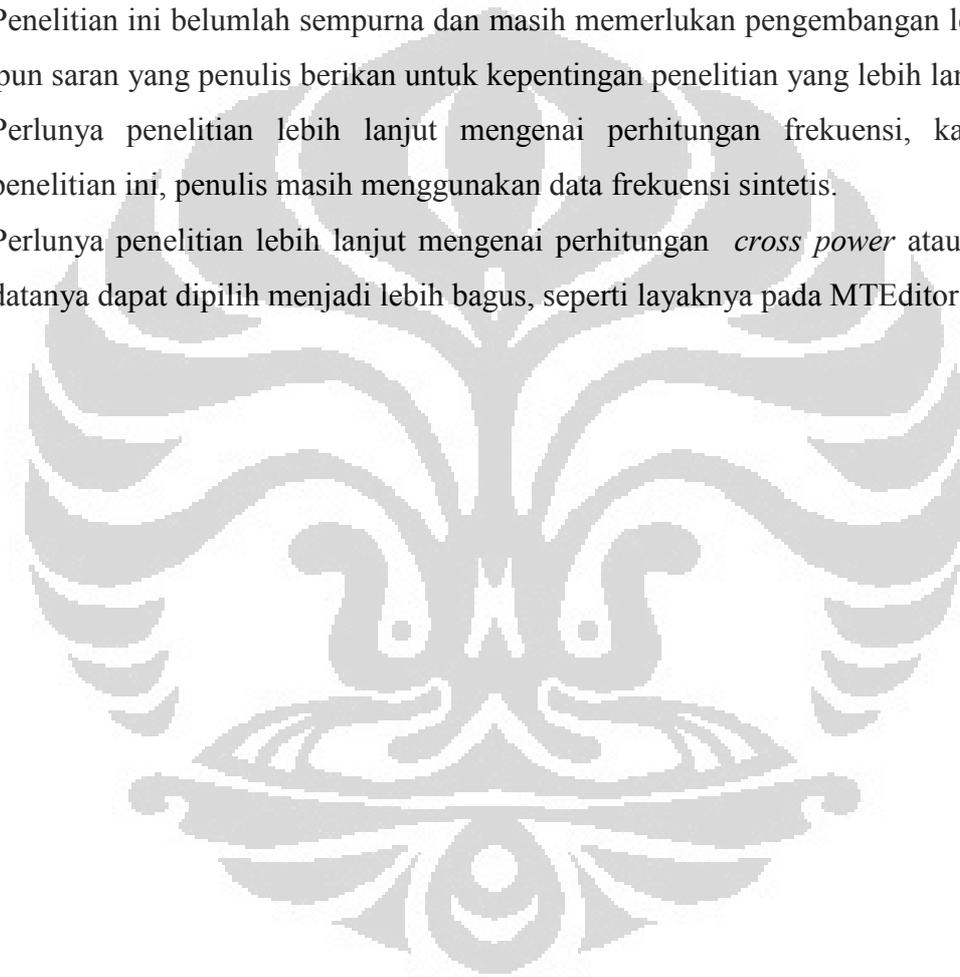
resistivitas TM, dan 60,48% untuk fase TM, namun naik sebesar 15.82% untuk fase TE.

4. Hasil inversi menunjukkan bahwa hasil pengolahan data dengan MATLAB yang memperhitungkan faktor kalibrasi lebih bagus dibandingkan dengan pengolahan data dengan menggunakan SSMT maupun dengan menggunakan MATLAB yang tanpa memperhitungkan faktor kalibrasi

5.2 Saran

Penelitian ini belumlah sempurna dan masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Adapun saran yang penulis berikan untuk kepentingan penelitian yang lebih lanjut adalah :

1. Perlunya penelitian lebih lanjut mengenai perhitungan frekuensi, karena pada penelitian ini, penulis masih menggunakan data frekuensi sintesis.
2. Perlunya penelitian lebih lanjut mengenai perhitungan *cross power* atau XPR agar datanya dapat dipilih menjadi lebih bagus, seperti layaknya pada MTEditor.



DAFTAR ACUAN

- Darma, Surya. 2011. *Current Outlook On Geothermal Sector In Indonesia*. Seminar Teknik Geofisika – ITB 2011.
- Daud, Y. (2010). *Electromagnetic Method: Success Story in Geothermal Exploration & Possibility for Hydrocarbon Exploration*. Diktat Kuliah. Depok.
- Fro, Jack. 2011. Pengaruh Sesar Terhadap Permeabilitas Batuan Pada Medan Panas Bumi. Dari <http://ptbudie.wordpress.com/2011/01/01/pengaruh-sesar-terhadap-permeabilitas-batuan-pada-medan-panasbumi/>
- Gupta, H., and Roy, S.. 2007. *Geothermal Energy : An Alternative Resource for the 21st Century*. Elsevier.
- Heditama, Dzil M.. 2011. Pemrosesan Data *Time Series* pada Metode Magnetotellurik (MT) menjadi Data Resistivitas Semu dan Fase Menggunakan MATLAB. Skripsi. Jurusan Fisika. Universitas Indonesia.
- Munadi, S. (2002). *Pengolahan Data Seismik Prinsip Dasar dan Metodologi*. Depok:Universitas Indonesia.
- Rusbianto, Andy. 2011. Reduksi *Noise* Pada Pemrosesan Data Magnetotellurik (MT) Dengan Menggunakan *Remote Reference*. Skripsi. Jurusan Fisika. Universitas Indonesia.
- Simpson, F., dan Bahr, K.. 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press.
- Smirnov, M. Y. 2003. *Magnetotelluric Data Processing with a Robust Statistical Procedure Having a High Breakdown Point*. *Geophys. J. Int.* 152 , 1-7.
- Sukhyar, R. 2011. Potensi Panasbumi Serta Prospek Pengembangannya di Indonesia. Presentasi Indogeothermal. Badan Geologi Kementrian ESDM.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge University Press.
- The Math Works, Inc. 2010. dari The Math Works Website <http://www.mathworks.com/help>
- Unsworth. 2006. *Overview of Electromagnetic Exploration Methods*. Geophysics .
- Unsworth. 2008. *Magnetotelluric – Field Techniques*. Geophysics.
- Unsworth. 2008. *Theory of magnetotellurics over a 2-D Earth*. Geophysics.