



**TUGAS AKHIR - RF 141501**

**INVERSI 1-D PADA DATA MAGNETOTELLURIK DI LAPANGAN  
X MENGGUNAKAN METODE OCCAM DAN SIMULATED  
ANNEALING**

R. Aldi Kurnia Wijaya  
NRP. 3712100011

Dosen Pembimbing:

Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT  
NIP. 19690906 199702 1001

Dr. Dwa Desa Warnana  
NIP. 19760123 200003 1001

Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*



**UNDERGRADUATE THESIS - RF 141501**

**1-D INVERSION ON MAGNETOTELLURIC DATA IN FIELD X  
USING OCCAM AND SIMULATED ANNEALING METHODS**

R. Aldi Kurnia Wijaya  
NRP. 3712100011

Advisor Lecturer:

Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT  
NIP. 19690906 199702 1001

Dr. Dwa Desa Warnana  
NIP. 19760123 200003 1001

Geophysical Engineering Department  
Faculty of Civil Engineering and Planning  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan **“Inversi 1-D Pada Data Magnetotellurik di Lapangan X Menggunakan Metode Occam dan Simulated Annealing”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 27 Juli 2016

R. Aldi Kurnia Wijaya  
Nrp. 3712100011

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

# INVERSI 1-D PADA DATA MAGNETOTELLURIK DI LAPANGAN X MENGGUNAKAN METODE OCCAM DAN SIMULATED ANNEALING

## TUGAS AKHIR

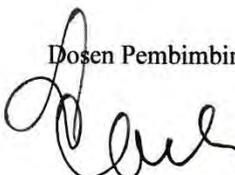
Diajukan untuk memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Jurusan Teknik Geofisika  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 27 Juli 2016

Menyetujui,

Dosen Pembimbing 1,

Dosen Pembimbing 2,

  
Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT  
NIP. 19690906 199702 1001

  
Dr. Dwa Desa Warnana  
NIP. 19760128 200003 1001

Mengetahui,  
Kepala Laboratorium  
Geofisika Eksplorasi

  
Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT  
NIP. 19690906 199702 1001

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

# INVERSI 1-D PADA DATA MAGNETOTELLURIK DI LAPANGAN X MENGUNAKAN METODE OCCAM DAN SIMULATED ANNEALING

Nama : R. Aldi Kurnia Wijaya  
NRP : 3712 100 011  
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT  
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Dwa Desa Warnana

## ABSTRAK

Metode magnetotellurik banyak digunakan dalam eksplorasi panas bumi, tambang, minyak, dan gas bumi. Pemodelan kondisi bawah permukaan dengan menggunakan metode magnetotellurik harus dilakukan proses inversi terlebih dahulu, banyak metode inversi yang digunakan untuk data magnetotellurik. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk membandingkan metode inversi 1-D berdasarkan pendekatannya, yaitu pendekatan linier (Occam) dan pendekatan global (Simulated Annealing). Data yang digunakan merupakan data non-linier berupa kurva resistivitas semu dan fase terhadap perioda dari hasil pengolahan data. Metode Occam merupakan metode untuk menyelesaikan permasalahan non-linier menggunakan pendekatan linier sedangkan metode Simulated Annealing merupakan metode untuk menyelesaikan permasalahan non-linier menggunakan pendekatan global, berupa *Guided Random Search*. Untuk menyelesaikan permasalahan non-linier tersebut dibuat program berbasis Matlab yang dengan menggunakan algoritma Occam dan Simulated Annealing sehingga program ini dapat digunakan untuk inversi 1-D dengan kedua metode tersebut, selain pembuatan program inverni dibuat juga program tambahan yang berguna mendukung proses inversi sehingga hasil inversi lebih optimum. Tahapan dalam penelitian ini adalah pembuatan program, validasi menggunakan data sintetik, analisa metode inversi, dan validasi dengan membandingkan hasil inversi program konvensional (WinGlink). Hasil dari penelitian ini adalah analisa terhadap penampang *cross section* resistivitas 1-D hasil inversi sehingga diketahui sebaran resistivitasnya di lapangan X.

**Kata Kunci:** Magnetotellurik, Inversi 1-D, Occam, Simulated Annealing.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

# **1-D INVERSION ON MAGNETOTELLURIC DATA IN FIELD X USING OCCAM AND SIMULATED ANNEALING METHODS**

Student Name : R. Aldi Kurnia Wijaya  
Student Number : 3712 100 011  
Advisor 1 : Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, MT  
Advisor 2 : Dr. Dwa Desa Warnana

## **ABSTRACT**

Magnetotelluric method common used in geothermal exploration, mining, oil, and earth gas. Modelling the subsurface conditions by magnetotelluric data using an inversion process, many inversion methods used for magnetotelluric data. Therefore, this study was conducted to compare 1-D inversion method based approach, namely a linear approach (Occam) and the global approach (Simulated Annealing). The data used is the data in the form of non-linear curve of apparent resistivity and phase of the period by data processing. Occam method is a method to solve non-linear problems using a linear approach while the method of Simulated Annealing is a method to solve the problems of non-linear using a global approach, in the form of Guided Random Search. To solve the problems of non-linear was created based program Matlab algorithms using Occam and Simulated Annealing so that the program can be used for inversion 1-D with both methods, in addition to making the inversion program also made additional programs that are useful supports inversion process so that the inversion more optimum. Stages of this research program is the manufacture, validation using synthetic data, analysis methods of inversion, and validation by comparing the results of inversion of conventional program (WinGlink). Results from this study is cross-sectional analysis of cross section 1-D resistivity inversion results that are known resistivity distribution in field X.

**Keywords:** magnetotelluric, 1-D inversion, Occam, Simulated Annealing.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya ucapkan kepada Allah S.W.T. karena atas rahmat dan karunia-Nya Proposal Tugas Akhir yang berjudul "**Inversi 1-D pada Data Magnetotellurik di Lapangan X menggunakan metode Occam dan Simulated Annealing**" dapat diselesaikan. Pelaksanaan dan penyusunan Proposal Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, dan dukungan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ayah, Ibu, serta semua keluarga atas dukungan yang sangat besar selama saya menjalani Kuliah di jurusan Teknik Geofisika ITS.
2. Bapak Widya Utama selaku ketua jurusan Teknik Geofisika ITS dan dosen wali yang telah membimbing saya selama kuliah di jurusan Teknik Geofisika ITS.
3. Bapak Ayi Syaeful Bahri dan Bapak Dwa Desa Warnana selaku dosen pembimbing di Teknik Geofisika ITS yang sudah memberikan segala arahan, bimbingan, waktu, dan ilmu yang diberikan kepada saya.
4. Bapak Nefrizal selaku penanggung jawab divisi Non-Seismic Survey (NSS) di PT. Elnusa Tbk. yang sudah mengizinkan saya melakukan tugas akhir di PT. ELnusa Tbk.
5. Bapak Arif Darmawan selaku pembimbing di PT. Elnusa Tbk. yang sudah memberikan saran, bimbingan, waktu, dan ilmu yang diberikan kepada saya.
6. Bapak dan Ibu dosen di Teknik Geofisika ITS yang telah memberikan banyak motivasi, bimbingan, waktu, dan ilmu yang diberikan kepada saya.
7. Staff dan pekerja jurusan Teknik Geofisika ITS yang banyak membantu dalam kegiatan akademik dan non-akademik kepada saya.
8. Teman-teman Teknik Geofisika ITS angkatan 2012 atas dukungannya.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan di dalam Proposal Tugas Akhir ini. Karenanya, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai pembelajaran bagi penulis untuk lebih baik lagi. Akhir kata, semoga Proposal ini dapat diterima dengan baik sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian sesuai Proposal yang telah dibuat ini.

Surabaya, 27 Juli 2016

Penulis,

R. Aldi Kurnia Wijaya  
3712100011

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## DAFTAR SIMBOL

B	medan magnet (T)
d	vector data
D	jumlah model yang diinversi
E	medan listrik (V/m)
$\Delta E$	perubahan misfit
e	eksponensial
f	frekuensi (Hz)
g(m)	fungsi pemodelan kedepan dari m
i	bilangan kompleks
J	matriks jacobi
m	model vector
N	jumlah lapisan
P	probabilitas
R	bilangan acak
T	periode (s)
$S^+$ , $S^-$	konstanta dari respon transfer matrix
t	waktu (s)
Z	impedansi (V/A)
$\delta$	<i>skin depth</i> (m)
$\rho_a$	resistivitas semu ( $\Omega m$ )
$\mu$	permeabilisat magnetik (H/m)
$\sigma$	konduktivitas (S/m)
$\omega$	frekuensi angular ( $s^{-1}$ )
$\emptyset$	fase ( $^\circ$ )
$\gamma$	konektivitas listrik
$u_i$	bilangan acak

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN COVER</b> .....	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>v</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	1
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB II DASAR TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Prinsip Dasar Metode Magnetotellurik.....	5
2.2 Sumber Gelombang Magnetotellurik .....	5
2.3 Penjalaran Gelombang Elektromagnetik .....	7
2.4 Pemodelan Kedepan .....	10
2.5 Penyelesaian Non-Linier dengan Pendekatan Linier (Occam) .....	11
2.6 Penyelesaian Non-Linier dengan Pendekatan Global (Simulated Annealing) .....	14
<b>BAB III METODOLOGI</b> .....	<b>19</b>
3.1 Pemodelan Inversi 1D Metode Occam .....	20
3.2 Pemodelan Inversi 1D Metode Simulated Annealing .....	21
3.3 Parameterisasi Model.....	22
3.4 Pengumpulan Data.....	23
3.5 Validasi .....	23
<b>BAB IV PEMBAHASAN</b> .....	<b>25</b>
4.1 Program Inversi .....	25
4.1.1 Program Inversi Metode Simulated Annealing .....	26
4.1.2 Program Inversi Metode Occam.....	28
4.2 Validasi Program Pada Data Sintetik .....	28
4.2.1 Validasi Metode Simulated Annealing .....	28
4.2.2 Validasi Metode Occam.....	30
4.3 Analisa Metode Inversi .....	32
4.4 Validasi Dengan Program Konvensional (WinGlink).....	38
4.5 Analisa Penampang .....	48

<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>53</b>
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	53
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>55</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>57</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>63</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Prinsip dasar metode MT	5
Gambar 2.2	Sumber gelombang MT	6
Gambar 2.3	Defleksi proton dan elektron pada <i>magnetopause</i>	6
Gambar 2.4	Skema terjadinya magnetotellurik	7
Gambar 2.5	Penjalaran gelombang EM di bumi	8
Gambar 2.6	Model 1-Dimensi yang terdiri dari n-lapisan horizontal homogen (bumi berlapis horizontal)	10
Gambar 2.7	Ilustrasi mekanisme pemilihan dua alternatif berdasarkan bobot probabilitas untuk dua harga $P(\Delta E)$ yang berbeda	17
Gambar 3.1	Alur kerja penelitian	19
Gambar 3.2	Algoritma pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan linier	21
Gambar 3.3	Algoritma Simulated Annealing sederhana untuk inversi non-linier	22
Gambar 3.4	Model sintetik	24
Gambar 4.1	Menu utama program	25
Gambar 4.2	Tampilan awal program inversi dengan metode Occam	25
Gambar 4.3	Tampilan awal program inversi dengan metode Simulated Annealing	26
Gambar 4.4	Hasil inversi Simulated Annealing terhadap data sintetik model 1	29
Gambar 4.5	Hasil inversi Simulated Annealing terhadap data sintetik model 2	29
Gambar 4.6	Hasil inversi Simulated Annealing terhadap data sintetik model 3	30
Gambar 4.7	Hasil inversi Occam terhadap data sintetik model 1	31
Gambar 4.8	Hasil inversi Occam terhadap data sintetik model 2	31
Gambar 4.9	Hasil inversi Occam terhadap data sintetik model 3	32
Gambar 4.10	Model hasil inversi dengan parameter pertama	33
Gambar 4.11	Hasil interpretasi model inversi Occam	34
Gambar 4.12	Grafik perbandingan waktu dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter pertama	35
Gambar 4.13	Grafik perbandingan misfit dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter pertama	35
Gambar 4.14	Model hasil inversi dengan parameter kedua	36
Gambar 4.15	Grafik perbandingan waktu dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter kedua	37

Gambar 4.16	Grafik perbandingan misfit dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter kedua	37
Gambar 4.17	Hasil inversi pada titik ITS7	39
Gambar 4.18	Hasil inversi pada titik ITS6	40
Gambar 4.19	Hasil inversi pada titik ITS5	41
Gambar 4.20	Hasil inversi pada titik ITS4	43
Gambar 4.21	Hasil inversi pada titik ITS3	44
Gambar 4.22	Hasil inversi pada titik ITS2	45
Gambar 4.23	Hasil inversi pada titik ITS1	47
Gambar 4.24	Penampang 2D berdasarkan model inversi 1D metode Occam	49
Gambar 4.25	Penampang 2D berdasarkan model inversi 1D metode Simulated Annealing	49
Gambar 4.26	Penampang 2D berdasarkan hasil model inversi 1D metode Occam	50

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Parameter yang berpengaruh terhadap model inversi untuk metode Simulated Annealing dan Occam	27
Tabel 4.2	Parameter yang berpengaruh terhadap model inversi untuk metode Simulated Annealing	27
Tabel 4.3	Parameter yang berpengaruh terhadap model inversi untuk metode Occam	28
Tabel 4.4	Parameter inversi yang digunakan	33
Tabel 4.5	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS7	39
Tabel 4.6	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS6	40
Tabel 4.7	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS5	42
Tabel 4.8	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS4	43
Tabel 4.9	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS3	44
Tabel 4.10	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS2	46
Tabel 4.11	Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS1	47

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## DAFTAR LAMPIRAN

Program inversi Simulated Annealing.....	57
Program inversi Occam .....	60

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Metode magnetotellurik merupakan metode elektromagnetik pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (B) alami pada arah ortogonal terhadap arah permukaan bumi dengan tujuan untuk menentukan konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman puluhan meter hingga ribuan meter (Simpson dan Bahr, 2005). Proses eksplorasi metode magnetotellurik dapat digunakan untuk eksplorasi tambang, panas bumi, minyak dan gas bumi. Sampai saat ini metode magnetotellurik terus berkembang karena semakin banyak digunakan dalam eksplorasi panas bumi, minyak, dan gas bumi.

Banyak metode inversi yang digunakan untuk data magnetotellurik untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan, tetapi secara garis besar terdapat dua jenis pendekatan yaitu pendekatan linier dan pendekatan global. Banyak penelitian yang membahas kedua pendekatan tersebut tetapi belum adanya penelitian untuk membandingkan hasil dari kedua pendekatan tersebut. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk membandingkan kedua pendekatan tersebut dengan cara membuat program inversi. Metode inversi yang diambil dalam penelitian ini adalah metode Occam yang mewakili penyelesaian masalah inversi non-linier dengan pendekatan linier dan metode Simulated Annealing yang mewakili penyelesaian masalah inversi non-linier dengan pendekatan global.

Proses inversi yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah inversi 1-D. Metode Occam dan Simulated Annealing digunakan dalam proses inversi magnetotellurik karena kedua metode ini cocok untuk menyelesaikan permasalahan non-linier, dimana data magnetotellurik yang berupa kurva resistivitas semu dan fase terhadap perioda yang merupakan data non-linier (Steven C. Constable, dkk, 1987).

Penelitian ini penggunaan dua jenis metode tersebut didasari dengan perbedaan pendekatan model awal yang digunakan untuk setiap metodenya. Metode Occam digunakan pendekatan linier untuk menyelesaikan permasalahan non-linier sedangkan untuk metode Simulated Annealing digunakan pendekatan global yang berupa *Guided Random Search* untuk menyelesaikan permasalahan non-linier. Dengan digunakannya kedua metode ini diharapkan mendapatkan model yang merepresentasikan kondisi dibawah permukaan yang lebih akurat.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan dalam penelitian ini:

1. Bagaimana program inversi 1-D untuk data magnetotellurik dengan menggunakan metode Occam dan Simulated Annealing?

2. Bagaimana perbedaan metode inversi Occam dan Simulated Annealing pada data magnetotellurik
3. Bagaimana sebaran resistivitas bawah permukaan berdasarkan pemodelan inversi 1-D menggunakan metode Occam dan Simulated Annealing?
4. Metode Inversi apakah yang lebih baik digunakan untuk data magnetotellurik?

### 1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini menggunakan data magnetotellurik untuk mengetahui persebaran resistivitas di lapangan X. Fokus dari penelitian ini adalah pembuatan program inversi 1-D dengan menggunakan metode Occam dan Simulated Annealing. Validasi program inversi dilakukan terhadap model sintetik dan inversi Occam pada program WinGlink. Analisa dilakukan terhadap hasil model inversi 1-D dari model sintetik dan data lapangan.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penulisan laporan tugas akhir adalah:

1. Membuat program inversi 1-D untuk data magnetotellurik dengan menggunakan metode Occam dan Simulated Annealing
2. Mengetahui perbedaan metode inversi Occam dan Simulated Annealing pada data magnetotellurik
3. Mengetahui sebaran resistivitas bawah permukaan berdasarkan pemodelan inversi 1-D menggunakan metode Occam dan Simulated Annealing
4. Mengetahui hasil inversi 1-D data magnetotellurik yang paling baik diantara metode Occam dan Simulated Annealing

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan proposal tugas akhir ini secara garisbesar adalah sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian dan sistematika penulisan.
2. Bab II Dasar Teori, berisi tentang prinsip metode magnetotellurik, sumber gelombang magnetotellurik, penjalaran gelombang elektromagnetik, *forward modelling* dan impedansi, penyelesaian permasalahan non-linier menggunakan pendekatan linier, dan

penyelesaian permasalahan non-linier menggunakan pendekatan global.

3. Bab III Metodologi penelitian, berisi tentang metodologi yang digunakan dalam penelitian, parameterisasi model, pengumpulan data, dan validasi.
4. Bab IV Pembahasan, berisi tentang hasil dan analisa penelitian yang meliputi program inversi, validasi program pada data sintetik, analisa metode inversi, validasi program dengan program konvensional (WinGlink), dan analisa penampang.
5. Bab V Penutup, berisi mengenai kesimpulan penelitian dan saran.

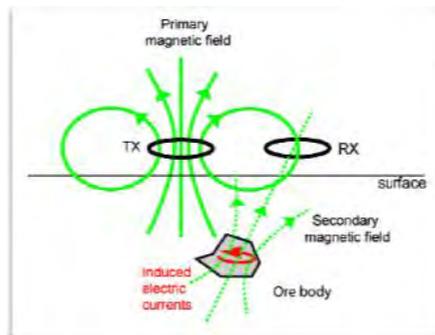
*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Prinsip Dasar Metode Magnetotellurik

Metode Magnetotellurik merupakan metode elektromagnetik (EM) pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (B) alami pada arah 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 Magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode geofisika yang dinilai paling baik digunakan dalam eksplorasi panasbumi karena kemampuannya untuk memetakan nilai resistivitas batuan di sistem panasbumi (Oskooi, 2006). Cakupan nilai frekuensi dari medan elektromagnetik alami yang terekam oleh alat adalah 320 –0,001 Hz.

Medan elektromagnetik alami (medan elektromagnetik primer) sebagai sumber metode magnetotellurik sampai ke Bumi dengan memiliki variasi terhadap waktu. Medan elektromagnetik tersebut menginduksi *ore body* di bawah permukaan Bumi sehingga timbul *eddy current* (arus *telluric*) yang menimbulkan medan elektromagnetik sekunder. *Receiver* (RX) yang berada di permukaan menangkap total medan elektromagnetik sebagai penjumlahan dari medan elektromagnetik primer dan medan elektromagnetik sekunder (Daud, 2011). Proses tersebut digambarkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1 Prinsip dasar metode magnetotellurik (Unsowrth, 2006)

### 2.2 Sumber Gelombang Magnetotellurik

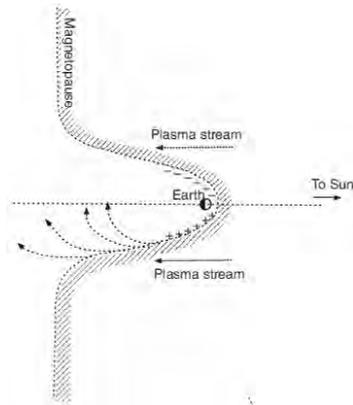
Variasi medan elektromagnet dapat berasal dari petir terlihat pada gambar 2.2 sebelah kanan atau interaksi dari *solar wind* dengan lapisan *magnetosphere* Bumi terlihat pada gambar 2.2 sebelah kiri (Simpson & Bahr, 2005). Medan elektromagnetik dengan frekuensi lebih dari 1 Hz berasal dari aktivitas meteorologi seperti *lightening discharge* (cahaya petir). Cahaya petir

dikenal sebagai *sferics* dan mencakup rentang frekuensi elektromagnetik. *Sferic* menjalar dalam *waveguide* sebagai gelombang *transvers electric* (TE), *transvers magnetic* (TM), atau gelombang *transvers electric dan magnetic* (TEM). Sedangkan interaksi antara *solar wind* dengan lapisan Magnetosphere dan *Ionosphere* Bumi menghasilkan gelombang electromagnet dengan frekuensi kurang dari 1 Hz. *Solar wind* adalah suatu aliran yang kontinu dari plasma, memancarkan sebagian besar proton dan elektron dari Matahari. Ketika *solar wind* mengenai *magnetopause* proton dan elektron akan berdefleksi ke arah yang berlawanan sehingga membentuk gelombang bidang sehingga menghasilkan medan listrik (Simpson & Bahr, 2005).



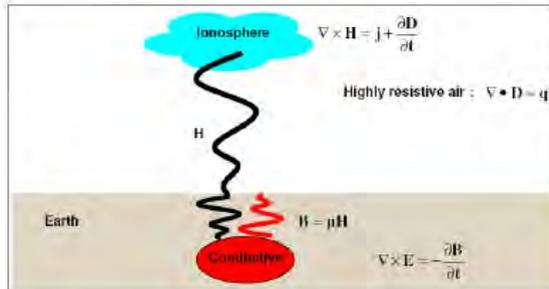
Gambar 2.2 Sumber gelombang MT (Daud, 2011)

Menurut Green dalam Simpson & Bahr (2005), dengan terjadinya peningkatan arus listrik dalam plasma dapat menimbulkan medan magnetik. Hasil efek magnetik yang timbul di *magnetopause*, medan elektromagnetik kemudian mengenai permukaan bumi seperti yang diperlihatkan oleh gambar 2.3.



Gambar 2.3 Defleksi proton dan elektron pada *magnetopause* (Simpson & Bahr, 2005)

Setelah mengenai bumi, medan elektromagnetik (EM) mengalami pembelokan atau refraksi vertikal (medan elektrik dan magnetik). Hal ini dikarenakan kontras resistivitas yang besar antara lapisan bumi dan udara. Medan EM kemudian berasosiasi dengan arus tellurik yang ada di bumi. Kemudian medan magnetik H menginduksi batuan konduktif dalam lapisan bumi yang kemudian menimbulkan arus *eddy* dan menghasilkan medan magnetik sekunder B. Perubahan medan magnet horisontal menginduksi perubahan medan listrik yang horisontal inilah yang akan diukur di permukaan. Secara matematis penjalaran gelombang elektromagnetik diperlihatkan oleh gambar 2.4.



Gambar 2.4 Konsep gelombang elektromagnetik yang mendasari metode magnetotellurik (Arumsari, 2007)

### 2.3 Penjalaran Gelombang Elektromagnetik

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

$$\delta \approx 500\sqrt{T\rho_a} \quad (2.1)$$

dimana  $\delta$  adalah *electromagnetik skin depth*,  $f$  adalah frekuensi, dan  $\rho_a$  adalah *apparent resistivity*.

Persamaan (2.1) menunjukkan bahwa *skin depth* tidak hanya bergantung pada nilai resistivitas batuan di bawah permukaan, tapi juga bergantung pada periode atau frekuensi alat yang digunakan. Semakin tinggi frekuensi alat yang digunakan maka akan semakin dangkal penetrasinya. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi alat yang digunakan, semakin dalam pula penetrasi yang didapatkan.

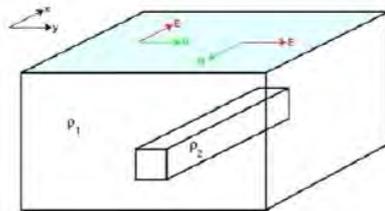
Medan elektromagnetik yang menginduksi Bumi secara alami dan digunakan untuk penelitian magnetotellurik memiliki rentang periode dari  $10^{-3}$

hingga  $10^5$  s. Jika diasumsikan resistivitas rata-rata batuan di kerak dan mantle Bumi adalah  $100 \Omega\text{m}$ , maka dengan persamaan (2.1) didapatkan penetrasi gelombang elektromagnetik mampu mencapai  $\sim 160$  m hingga  $>5$  km. Inilah keuntungan menggunakan metode magnetotellurik dibandingkan metode elektromagnetik yang lainnya (Simpson & Bahr, 2005).

Parameter yang diukur pada saat akuisisi magnetotellurik adalah medan listrik dan medan magnetik bumi yang bervariasi terhadap waktu. Gelombang elektromagnetik merupakan jenis gelombang planar/bidang, dimana medan listrik dan medan magnet selalu tegak lurus satu sama lain. Rasio dari kuat medan listrik dan kuat medan magnet dapat didefinisikan sebagai impedansi gelombang ( $Z$ ) dari suatu medium. Hal ini menunjukkan penjalaran gelombang planar, hanya bergantung pada karakteristik listrik di suatu medium dan frekuensi gelombangnya. Secara dimensional, impedansi gelombang diekspresikan dalam ohm (Simpson & Bahr, 2005).

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \frac{-i\mu\omega}{\gamma} \frac{Ae^{yZ} + e^{-yZ}}{Ae^{yZ} - e^{-yZ}} \quad (2.2)$$

Dalam merekam gelombang elektromagnetik digunakan dua sensor pada saat akuisisi, yaitu sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus. Cara peletakan sensor elektrik dan sensor magnetik menghasilkan 2 jenis modulus pengukuran. Yang pertama adalah *Transverse Electric* (TE) dimana komponen medan listrik searah dengan arah strike (arah x) dan komponen medan magnet berada pada bidang y-z. Yang kedua adalah *Transverse Magnetic Mode* (TM) dimana komponen medan magnet searah dengan arah strike (arah x) dan komponen medan listrik berada pada bidang y-z.



Gambar 2.5 Penjalaran gelombang EM di bumi (Unsworth, 2008)

Penjalaran gelombang elektromagnetik di bumi dapat dijelaskan seperti pada gambar 2.5 di atas dimana anggapan awal adalah struktur sejajar dengan sumbu x. Kedua jenis modulus (TE dan TM) dapat dijelaskan dari persamaan Maxwell berikut ini (Naidu, 2012):

$$\nabla \times B = \mu\sigma E \text{ dan } \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

Komponen persamaan (2.3) dapat dituliskan menjadi persamaan-persamaan berikut ini;

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} &= \mu\sigma E_x; & \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} &= \mu\sigma E_y; & \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} &= \mu\sigma E_z; \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -i\omega B_x; & \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -i\omega B_y; & \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega B_z; \end{aligned}$$

Pada struktur resistivitas yang terlihat pada gambar 2.5, tidak ada variasi resistivitas pada sumbu x sehingga  $\frac{\delta}{\delta x} = 0$ . maka persamaan di atas menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} &= \mu\sigma E_x; & \frac{\partial B_x}{\partial z} &= \mu\sigma E_y; & -\frac{\partial B_x}{\partial y} &= \mu\sigma E_z; \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -i\omega B_x; & \frac{\partial E_x}{\partial z} &= -i\omega B_y; & -\frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega B_z; \end{aligned}$$

Persamaan-persamaan di atas dapat dipisahkan menjadi dua subjek. Subjek pertama adalah  $E_x$ ,  $B_y$ , dan  $B_z$  dimana medan listrik terpolarisasi sejajar dengan arah struktur ( $E_x$ ) sedangkan komponen medan magnet berada pada bidang  $y$ - $z$  ( $B_y$  dan  $B_z$ ). Subjek pertama ini disebut sebagai *Transverse Electric Mode* (TE) dengan persamaan yang telah diturunkan sebagai berikut.

$$\frac{\partial^2 E_x(y,z)}{\partial z^2} = i\omega\sigma E_x(y,z) + \frac{\partial^2 E_x(y,z)}{\partial y^2} \quad (2.4)$$

Subjek kedua adalah  $B_x$ ,  $E_y$ , dan  $E_z$  yang mana medan magnet terpolarisasi sejajar dengan arah struktur ( $B_x$ ) sedangkan komponen medan listrik berada pada bidang  $y$ - $z$  ( $E_y$  dan  $E_z$ ). Subjek pertama ini disebut sebagai *Transverse Magnetic Mode* (TM) dengan persamaan yang telah diturunkan sebagai berikut

$$\frac{\partial^2 B_x(y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x(y,z)}{\partial z^2} = i\omega\sigma B_x(y,z) \quad (2.5)$$

Parameter yang dianalisa adalah *apparent resistivity* dan phase. Persamaan *apparent resistivity* didasari oleh nilai impedansi gelombang. Dan karena terdapat dua modus pengukuran maka terdapat dua nilai *apparent resistivity* juga yaitu  $\rho_{xy}$  (TE) dan  $\rho_{yx}$  (TM). (Unsworth,2008)

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

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (2.7)$$

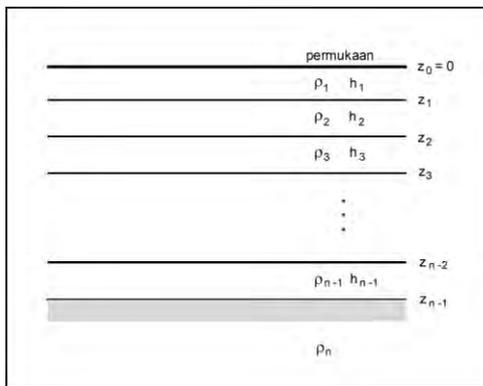
$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.8)$$

$$\phi_{yx} = \tan^{-1} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (2.9)$$

## 2.4 Pemodelan Kedepan

Impedansi dinyatakan sebagai perbandingan antara medan listrik (E) dan medan magnet (B) yang bergantung pada tahanan-jenis medium atau batuan. Dengan demikian, impedansi sebagai fungsi dari periode memberikan informasi mengenai tahanan-jenis medium sebagai fungsi dari kedalaman. Berdasarkan hal tersebut metode *sounding* magnetotellurik dilakukan dengan merekam data berupa variasi medan listrik dan medan magnet pada beberapa periode tertentu.

Jika tahanan-jenis hanya bervariasi terhadap kedalaman, maka model yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi ini adalah model 1-dimensi (1-D). Pada umumnya digunakan model yang terdiri dari beberapa lapisan horisontal dengan masing-masing lapisan bertahanan-jenis konstan atau homogen dan isotropis (model bumi berlapis horisontal). Dalam hal ini parameter model adalah tahanan-jenis dan ketebalan tiap lapisan dengan lapisan terakhir berupa medium homogen (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Model 1-Dimensi yang terdiri dari n-lapisan horisontal homogen (bumi berlapis horisontal).

Parameter model adalah tahanan-jenin ( $\rho$ ) dan ketebalan ( $h$ ) tiap lapisan, lapisan terakhir adalah *alf-space* dengan ketebalan tak terhingga. Secara umum hubungan data dari parameter model dinyatakan oleh (Grandis, 2008) :

$$d = g(m) \quad (2.10)$$

dimana  $d$  adalah vektor data,  $m$  adalah vektor model, dan  $g(m)$  adalah fungsi *forward modelling*.

Dalam penelitian ini pemodelan kedepan bereferensi dari algoritma yang dibuat Hendra Grandis (1999).

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{B}_1 \end{pmatrix} &= \prod_{j=1}^{k-1} T_j \cdot T_k \cdot \prod_{j=k+1}^{N-1} T_j \begin{pmatrix} E_N \\ B_N \end{pmatrix} \\ &= S^+ \cdot T_k \cdot S^- \begin{pmatrix} E_N \\ B_N \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dimana  $T$  adalah parameter model (resistivitas dan ketebalan),  $E$  adalah medan listrik,  $H$  adalah medan magnet,  $N$  adalah jumlah lapisan,  $S^+$  dan  $S^-$  adalah konstanta dari respon transfer matrix.

## 2.5 Penyelesaian Non-Linier dengan Pendekatan Linier (Occam)

Secara umum sebagian besar permasalahan inversi dalam geofisika adalah inversi non-linier. Meskipun demikian pada beberapa kasus, permasalahan inversi dapat dipilih atau dibuat menjadi linier ataupun non-linier bergantung pada parameterisasi model yang dipilih. Hubungan antara data dengan parameter model secara umum dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$d = g(m) \quad (2.12)$$

Persamaan tersebut dapat pula digunakan untuk menyatakan hubungan antara data dengan parameter model yang direpresentasikan oleh suatu fungsi non-linier. Dalam hal ini  $g$  adalah suatu fungsi pemodelan kedepan (*forward modeling*) yang merupakan fungsi non-linier dari parameter model. Fungsi  $g$  dinyatakan dalam notasi vektor untuk menyatakan adanya komponen yang berasosiasi dengan komponen data.

Misalkan solusi inversi dari persamaan (2.12) adalah model  $m$  yang merupakan suatu model awal  $m_0$  yang diperturbasi dengan  $\Delta m$  agar diperoleh kecocokan yang lebih baik antara respons model tersebut dengan data:

$$m = m_0 + \Delta m \quad (2.13)$$

$$d = g(m_0 + \Delta m) \quad (2.14)$$

Jika persamaan (14) dituliskan kembali dalam bentuk komponennya maka diperoleh:

$$d_i = g_i(m_0^{(j)} + \delta m_j) \quad (2.15)$$

dimana  $i = 1, 2, \dots, N$  dan  $j = 1, 2, \dots, M$  dengan  $N$  dan  $M$  masing-masing adalah jumlah data dan jumlah parameter model.

Ekspansi Taylor orde pertama fungsi  $g(m)$  disekitar suatu model awal  $m_0$  dengan menggunakan notasi komponen seperti persamaan (2.15) menghasilkan:

$$g_i(m_0^{(j)} + \delta m_j) \approx g_i(m_0^{(j)}) + \frac{\partial g_i}{\partial m_j} | \delta m_j + O(\delta m_j) \quad (2.16)$$

dimana  $O(\delta m_j)$  adalah suku sisa yang melibatkan turunan orde ke-dua dan orde-orde lebih tinggi. Hasil substitusi persamaan (2.16) ke dalam persamaan (11) dengan mengabaikan suku sisa tersebut adalah sebagai berikut:

$$d = g_i(m_0^{(j)}) + \frac{\partial g_i}{\partial m_j} | \delta m_j \quad (2.17)$$

Suku ke-dua pada ruas kanan persamaan (2.17) adalah komponen turunan parsial fungsi  $g(m)$  terhadap suatu elemen parameter model  $m$  yang membentuk matriks Jacobi berikut:

$$J_{ij} = \frac{\partial g_i}{\partial m_j} \quad (2.18)$$

Selanjutnya, substitusi dan pengaturan kembali persamaan (2.18) menghasilkan:

$$d - g(m_0) = J_0 \Delta m_0 \text{ atau } \Delta d_0 = J_0 \Delta m_0 \quad (2.19)$$

dimana  $J_0$  adalah matriks Jacobi yang dievaluasi pada  $m=m_0$ , dimana simbol  $_$  menyatakan bahwa bilangan tersebut adalah bilangan kompleks. Dengan menganggap  $\Delta d_0 = d - g(m_0)$  maka persamaan (2.19) mirip dengan persamaan yang berlaku pada hubungan linier antara data dengan parameter model, yaitu  $d = Gm$ . Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa data digantikan oleh perturbasi data dan model menjadi perturbasi model. Sementara itu matriks kernel digantikan oleh matriks Jacobi yang menyatakan sejauh mana data prediksi berubah sebagai akibat dari perubahan atau perturbasi model. Oleh

karena itu matriks Jacobi sering pula disebut sebagai matriks sensitivitas (sensitivity matrix).

Kemiripan bentuk persamaan (2.19) dengan persamaan yang menyatakan hubungan linier antara data dengan parameter model  $d = Gm$  mengindikasikan hubungan linier antara  $\Delta d_0 = d - g(m_0)$  dengan  $\Delta m_0$ . Berdasarkan analogi, solusi inversi dalam bentuk  $\Delta m_0$  dari suatu permasalahan yang dapat dinyatakan oleh persamaan (2.19) adalah sebagai berikut:

$$\Delta m_0 = [J_0^T J_0]^{-1} J_0^T (d - g(m_0)) \quad (2.20)$$

Persamaan (16) pada dasarnya menyatakan perturbasi yang diperlukan terhadap suatu model awal  $m_0$  agar diperoleh model yang lebih baik, yaitu  $m = m_0 + \Delta m$ . Respons model  $m$  diharapkan lebih fit dengan data.

Mengingat sifat non-linier dari fungsi yang menghubungkan data dengan parameter model (pemodelan kedepan) maka pendekatan orde pertama tersebut tidak dapat langsung menghasilkan model optimum. Oleh karena itu proses perturbasi model dilakukan terhadap model awal  $m_0$  secara iteratif menggunakan persamaan (2.20) sampai diperoleh konvergensi menuju solusi optimum.

Untuk memperoleh solusi inversi atau model optimum diperlukan perturbasi secara iteratif suatu model awal  $m_0$ . Dengan demikian pada iterasi ke-(n+1) perturbasi dilakukan terhadap model hasil iterasi sebelumnya dengan menggunakan persamaan berikut:

$$m_{n+1} = m_n + [J_n^T J_n]^{-1} J_n^T (d - g(m_n)) \quad (2.21)$$

Dalam penyelesaian permasalahan non-linier menggunakan pendekatan linier ada beberapa metode yang dikenal yaitu metode gradient, metode Gauss-Newton, metode Levenberg-Marquardt dan metode Occam. Metode gradien sangat lamban jika dibandingkan dengan metode Gauss-Newton, terutama jika sudah dekat dengan solusi atau nilai minimum fungsi obyektif. Hal ini disebabkan oleh harga gradien yang semakin kecil. Di lain pihak, metode gradien cukup efektif pada saat awal iterasi dimana metode Gauss-Newton dapat mengalami overshoot. Oleh karena itu kombinasi yang tepat antara kedua metode dapat memperbaiki kinerja tiap metode yang diterapkan secara terpisah. Kombinasi dilakukan dengan menerapkan metode gradien pada saat awal iterasi yaitu saat masih jauh dari solusi, kemudian semakin dekat dengan solusi digunakan metode quasi-Newton. Metode kombinasi tersebut dikenal sebagai metode Levenberg-Marquardt. Sedangkan metode Occam merupakan pengembangan dari metode Levenberg-marquardt dengan menambahkan parameter delta untuk *smoothing* berdasarkan regulasi tikhonov orde 1.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & & \\ -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & -1 & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.22)$$

Sehingga parameter yang digunakan menjadi (Aster, 2005):

$$\begin{aligned} \hat{d} &= d - g(m_n) + \underline{J}_n m_n \\ m_{n+1} &= \left[ \underline{J}_n^T \underline{J}_n + \alpha^2 L^T L \right]^{-1} \underline{J}_n^T \hat{d} \end{aligned} \quad (2.23)$$

## 2.6 Penyelesaian Non-Linier dengan Pendekatan Global (Simulated Annealing)

Salah satu metode *guided random search* atau pencarian acak terarah adalah metode Simulated Annealing (SA). Metode Simulated Annealing dalam inversi didasarkan pada analogi dengan proses termodinamika pembentukan kristal suatu substansi. Pada temperature tinggi suatu substansi berbentuk cair, kemudian proses pendinginan secara perlahan-lahan menyebabkan terbentuknya kristal yang berasosiasi dengan energi sistem yang minimum. Probabilitas Boltzmann menyatakan hubungan antara probabilitas suatu sistem pada konfigurasi  $m$  dan temperatur  $T$  dengan energi  $E$  sebagai fungsi dari konfigurasi tersebut (Grandis, 2008):

$$P(m) \propto \exp(-E(m)/kT) \quad (2.24)$$

dimana  $k$  adalah konstanta Boltzmann dan konfigurasi sistem dinyatakan oleh  $M$  parameter yaitu  $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)$ .

Menurut persamaan (24) pada temperatur tinggi sistem dapat mengalami perubahan konfigurasi dan perturbasi yang menghasilkan konfigurasi dengan energi rendah memiliki probabilitas lebih besar. Meskipun demikian, perturbasi yang menghasilkan konfigurasi dengan energi tinggi masih dimungkinkan (probabilitas tidak nol). Pada saat temperatur menurun, perturbasi yang menghasilkan konfigurasi dengan energi lebih rendah memiliki probabilitas makin besar, sedangkan perturbasi yang menghasilkan konfigurasi dengan energi lebih tinggi probabilitasnya makin kecil. Pada  $T$  mendekati 0 terbentuk kristal yaitu konfigurasi dengan energi minimum. Jika proses pendinginan terlalu cepat

maka kondisi kesetimbangan dengan energi minimum tidak dapat dicapai sehingga terbentuk poli-kristal atau gelas yang bersifat amorf.

Proses pembentukan kristal (annealing) dalam termodinamika diadopsi dalam penyelesaian masalah inversi, yaitu dengan menggunakan parameter model  $m$  untuk mendefinisikan konfigurasi sistem dan fungsi obyektif (misfit)  $E$  sebagai energi. Dalam hal inversi,  $T$  merupakan faktor pengontrol yang tetap disebut sebagai "temperatur" meskipun tidak memiliki arti fisis sebagaimana pada proses annealing. Dalam hal ini satuan  $T$  sama dengan satuan fungsi obyektif dan dipilih  $k = 1$ .

Perturbasi model dengan mekanisme simulated annealing dimaksudkan untuk mengeksplorasi ruang model secara acak namun lebih terarah. Beberapa algoritma yang dapat digunakan untuk mengimplementasikan metode Simulated Annealing pada inversi nonlinier antara lain adalah algoritma Metropolis, algoritma heat bath, algoritma rantai Markov (Markov Chains) dan lain lain. Dalam hal ini hanya akan dibahas algoritma Metropolis sederhana yang pada dasarnya terdiri dari dua langkah, yaitu perturbasi model dan penentuan diterima atau tidaknya perturbasi model tersebut.

Sebagaimana pada pencarian sistematis dan pencarian acak, ruang model harus didefinisikan terlebih dahulu dengan menentukan secara "a priori" interval harga minimum dan maksimum parameter model  $[m_i^{min}, m_i^{max}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$  dimana  $M$  adalah jumlah parameter model. Interval tersebut tidak perlu sama untuk setiap elemen parameter model. Perturbasi atau pemilihan harga parameter model  $m_i$  ditentukan secara acak sebagai bilangan sebarang dalam interval  $m_i^{min} < m_i < m_i^{max}$ . Caranya adalah mengambil bilangan acak  $R$  dengan probabilitas uniform antara 0 dan 1 yang dipetakan menjadi harga parameter model menggunakan persamaan berikut (Grandis, 2008):

$$m_i = m_{o_i} + R(m_i^{max} - m_i^{min}) \quad (2.25)$$

Penggunaan persamaan (2.21) di atas untuk perturbasi model atau menentukan harga parameter model menghasilkan bilangan kontinu dalam interval  $m_i^{min} < m_i < m_i^{max}$ . Alternatif mekanisme perturbasi yang lain adalah memilih secara acak harga diskret dalam interval  $[m_i^{min}, m_i^{max}]$ . Contohnya seperti pada penentuan epister gempu dengan pemilihan parameter model secara acak pada grid dengan spasi tertentu. Misalnya interval  $[m_i^{min}, m_i^{max}]$  terbagi menjadi  $L$  sub-interval, yaitu  $[m_i^1, m_i^2, \dots, m_i^L]$  Parameter model ditentukan dengan mengambil bilangan acak  $R$  dengan probabilitas uniform antara 0 dan 1 yang dipetakan menjadi bilangan bulat antara 1 dan  $L$ . Bilangan bulat tersebut menjadi indeks dari  $m_i$  yang terpilih sebagai harga parameter model.

Sebagaimana batas harga minimum dan maksimum dapat berbeda untuk setiap parameter model, maka jumlah sub-interval tersebut dapat pula

berbeda untuk setiap parameter model. Hal tersebut dimaksudkan untuk menentukan resolusi masing-masing parameter model dalam penyelesaian inversi. Dengan demikian jumlah sub-interval  $L$  memiliki indeks sesuai elemen atau indeks parameter model,  $L_i$ .

Dalam penelitian ini digunakan algoritma *Very Fast Simulated Annealing* (VFSA). Penggunaan ini bertujuan agar pencarian model inversi lebih cepat dibandingkan metode *Fast Simulated Annealing* dan *Simulated Annealing* biasa. Dalam algoritma VFSA  $R$  yang awalnya adalah bilangan acar dengan probabilitas uniform antara 0 dan 1 diganti menjadi persamaan sebagai berikut (Ingber, 1989):

$$R = \text{sgn}(u_i - 0.5) T_n \left[ \left(1 + \frac{1}{T_n}\right)^{|2u_i - 1|} - 1 \right] \quad (2.26)$$

Dimana  $u_i$  adalah bilangan acak dengan probabilitas uniform antara 0 dan 1,  $T_n$  merupakan temperatur yang berubah berdasarkan iterasi.

Pada suatu iterasi ke- $n$  perturbasi model menghasilkan perubahan fungsi obyektif atau perubahan misfit  $\Delta E$  dimana  $\Delta E = E(m_{n+1}) - E(m_n)$ . Terdapat dua kemungkinan harga  $\Delta E$  yang dihasilkan, yaitu  $\Delta E \leq 0$  atau  $\Delta E > 0$  yang akan menentukan penerimaan atau penolakan hasil perturbasi.

Jika  $\Delta E \leq 0$  berarti perturbasi model menghasilkan misfit yang lebih kecil dari (atau sama dengan) sebelumnya. Artinya perturbasi menghasilkan model yang lebih baik dari (atau sama dengan) model sebelumnya. Pada kasus ini perturbasi model selalu diterima dan iterasi dilanjutkan dengan menggunakan model hasil perturbasi tersebut. Mekanisme ini memungkinkan pencarian model dengan misfit yang makin rendah.

Jika  $\Delta E > 0$  berarti perturbasi model menghasilkan misfit yang lebih besar dari pada sebelumnya. Perturbasi model tersebut diterima dengan probabilitas yang dirumuskan oleh persamaan berikut (Grandis, 2008):

$$P(\Delta E) = \exp(-\Delta E/kT) \quad (2.27)$$

Pada kasus ini  $0 < P(\Delta E) < 1$  dan mekanisme penentuan hasil perturbasi diterima dengan probabilitas  $P(\Delta E)$  diperlihatkan gambar 2.7. Untuk suatu bilangan acak  $R$  dengan distribusi uniform pada interval  $[0, 1]$  jika  $R \leq P(\Delta E)$  maka perturbasi model diterima, jika  $R > P(\Delta E)$  maka perturbasi model ditolak. Jika hasil perturbasi model ditolak maka model dikembalikan ke model sebelum dilakukan perturbasi. Iterasi dilanjutkan dengan model tersebut. Mekanisme probabilistik yang memungkinkan perturbasi model diterima meskipun misfitnya lebih besar dimaksudkan untuk menghindari terjebaknya proses iterasi pada minimum lokal.

Secara umum untuk harga  $T$  tertentu dan  $\Delta E > 0$ , jika  $\Delta E$  kecil maka probabilitas  $P(\Delta E)$  besar sehingga hasil perturbasi model memiliki kemungkinan

lebih besar untuk diterima. Sebaliknya jika  $\Delta E$  besar maka probabilitas  $P(\Delta E)$  kecil sehingga hasil perturbasi model memiliki kemungkinan kecil untuk diterima (atau hasil perturbasi model memiliki kemungkinan besar untuk ditolak). Artinya perturbasi model yang menghasilkan misfit sedikit lebih besar lebih mungkin diterima.

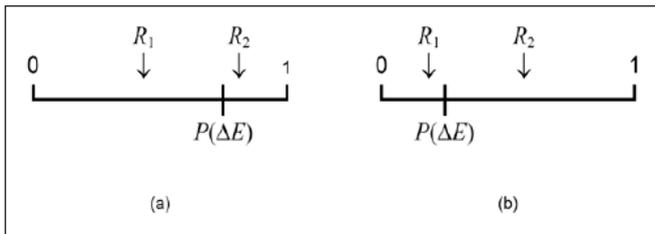
Proses iteratif dimulai dengan faktor temperatur  $T$  cukup tinggi sehingga hampir semua perturbasi model akan diterima karena berapapun harga  $\Delta E$  jika  $\Delta E > 0$  maka harga  $P(\Delta E)$  akan cukup besar (Gambar 2.7(a)). Pada fase ini dapat dikatakan bahwa pencarian model dilakukan secara hampir acak murni. Pada saat temperatur turun secara perlahan, perturbasi yang menghasilkan fungsi obyektif yang lebih kecil ( $\Delta E < 0$ ) akan lebih dominan dalam menentukan model.

Dalam algoritma VFSA perubahan temperatur dirumuskan sebagai berikut (Ingber, 1989):

$$T_n(k) = T_{0n} e^{-c_n k^{1/D}} \quad (2.28)$$

Dimana  $n$  merupakan perubahan berdasarkan iterasi, sedangkan  $c_n$  adalah konstanta tetap yang memiliki nilai berbeda-beda berdasarkan masalah yang diselesaikan,  $D$  adalah jumlah model yang diinversi.

Meskipun demikian, perubahan model yang menghasilkan fungsi obyektif yang lebih besar dibanding sebelumnya atau  $\Delta E > 0$  tetap memiliki kemungkinan untuk diterima terutama jika harga  $\Delta E$  tidak terlalu besar (atau  $P(\Delta E)$  tidak terlalu kecil). Artinya perturbasi yang menjauhi suatu solusi yang sementara dianggap optimum tetap memiliki kemungkinan untuk diterima meskipun probabilitasnya kecil (Gambar 2.7(b)). Solusi optimum sementara tersebut kemungkinan berasosiasi dengan minimum lokal (near optimum solution) dan bukan minimum global. Mekanisme ini memungkinkan algoritma menghindari atau keluar dari minimum lokal.



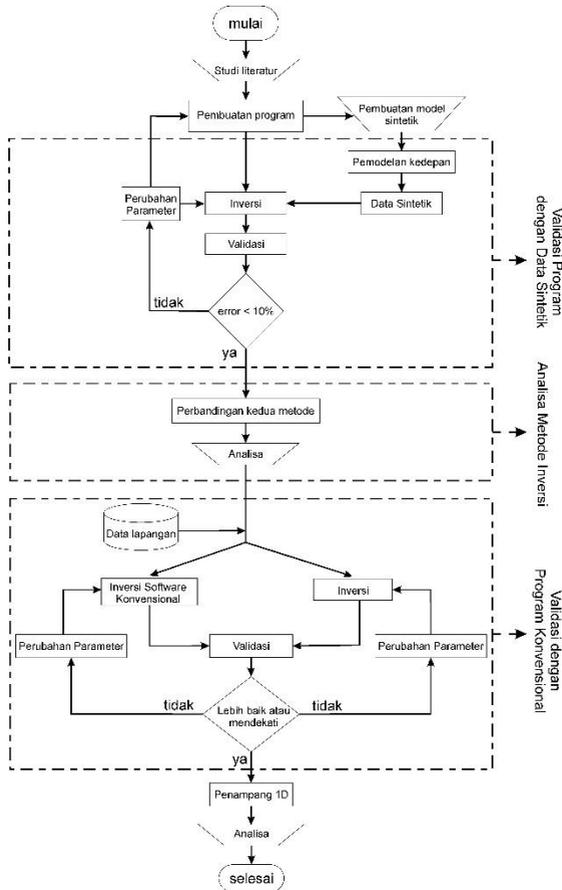
Gambar 2.7 Ilustrasi mekanisme pemilihan dua alternatif berdasarkan bobot probabilitas untuk dua harga  $P(\Delta E)$  yang berbeda. (a) Jika probabilitas  $P(\Delta E)$  besar maka bilangan random  $R$  memiliki kemungkinan lebih besar berada pada posisi  $R_1$  dan model diterima. (b) Jika probabilitas  $P(\Delta E)$  kecil maka bilangan random

R memiliki kemungkinan lebih besar berada pada posisi R2 dan model ditolak.

Pada saat faktor temperatur T semakin kecil, perubahan model dengan  $\Delta E \geq 0$  selalu menghasilkan  $P(\Delta E)$  yang kecil sehingga perturbasi hampir selalu ditolak karena R hampir selalu lebih besar dari  $P(\Delta E)$ . Dengan asumsi bahwa faktor temperatur turun T secara sangat perlahan dan untuk setiap harga T dilakukan perturbasi model dengan jumlah yang cukup besar maka algoritma akan konvergen menuju minimum global.

# BAB III METODOLOGI

Secara garis besar penelitian ini bertujuan untuk membuat program inversi 1-D magnetotellurik dengan metode Occam dan Simulated Annealing yang kemudian dilakukan analisa terhadap model hasil inversi. Alur kerja penelitian ini diperlihatkan oleh gambar 3.1.



Gambar 3.1 Alur kerja penelitian

Awal dari penelitian ini adalah studi literatur yang berguna untuk mencari referensi mengenai prinsip dasar kedua metode inversi, algoritma (inversi dan pemodelan kedepan), program pendukung inversi, dan lain-lain. Setelah mendapatkan referensi yang cukup kemudian dimulai pembuatan

program inversi metode Occam dan Simulated Annealing, selain pembuatan program inveri dibuat juga program tambahan yang berguna mendukung proses inversi sehingga hasil inversi lebih optimum. Program dibuat menggunakan program Matlab. Untuk melakukan validasi pertama terhadap program yang telah dibuat, terlebih dahulu dibuat model sintetik yang kemudian dilakukan pemodelan kedepan sehingga mendapatkan data sintetik dari model sintetik. Validasi pertama dilakukan untuk masing-masing metode inversi terhadap data sintetik, apabila rms error didapatkan lebih kecil dari 10% maka proses penelitian dilanjutkan tahapan selanjutnya. Tetapi apabila didapatkan rms error yang lebih besar dari 10% maka hal pertama adalah melakukan prubahan parameter untuk inversi, apabila tidak berhasil maka dilakukan perbaikan terhadap program sehingga didapatkan rms error yang lebih baik.

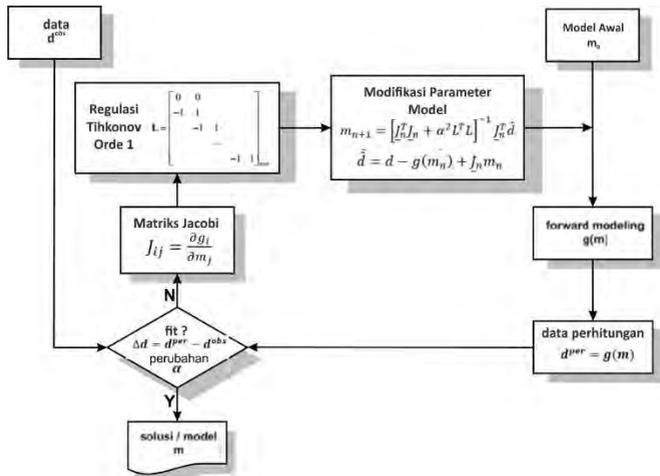
Analisa pertama yang dilakukan adalah analisa metode inversi antara metode Occam dengan Simulated Annealing. Analisa dilakukan terhadap hasil inversi kedua metode dengan data sintetik dan parameter yang sama. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan pada setiap metode.

Setelah analisa pada metode inversi kemudian dilanjutkan melakukan inversi pada data hasil pengukuran dilapangan. Dalam hal ini dilakukan inversi dengan kedua metode yang kemudian dibandingkan dengan hasil inversi dari program konvensional. Apabila hasil dari inversi dari program yang dibuat mendekati atau bahkan lebih baik dari program konvensional maka dapat dilanjutkan pada tahap selanjutnya, untuk mengetahui lebih baik atau tidaknya dilihat dari rms error dan kesesuaian model yang dihasilkan. Apabila hasil inversi tidak mendekati maka dilakukan perubahan parameter.

Tahadap terakhir adalah melakukan analisa pada model hasil inversi metode Occam dan Simulated Annealing. Iterpretasi dilakukan untuk megnetahui sistem panas bumi di lapangan X. Untuk mendapatkan sistem panas bumi, model 1D hasil inversi diinterpolasi untuk setiap titik kemudian dilakukan kontur antar titik sehingga menampilkan penampang pada satu lintasan hasil inversi 1D.

### **3.1 Pemodelan Inversi 1D Metode Occam**

Inversi 1D dengan menggunakan metode occam termasuk kedalam penyelesaian inversi non-linier dengan menggunakan pendekatan linier. Adapaun algoritma dalam menyelesaikan permasalahan non-linier dalam hal ini adalah data magnetotellurik dengan pendekatan linier seperti pada gambar 3.2,

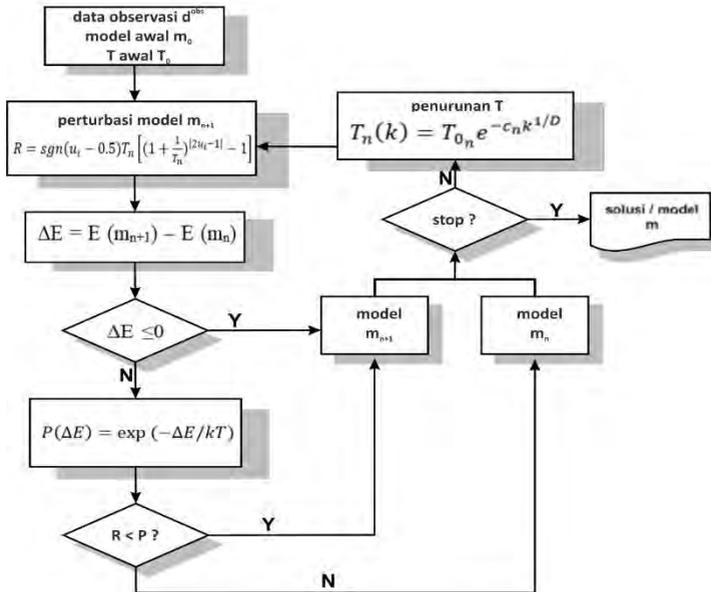


Gambar 3.2 Algoritma pemodelan inversi non-linier dengan pendekatan linier (Grandis, 2009)

Dalam pemodelan inversi 1D metode Occam dapat dilakukan untuk kasus linier dan non-linier.

### 3.2 Pemodelan Inversi 1D Metode Simulated Annealing

Untuk inversi 1D menggunakan metode Simulated Annealing termasuk kedalam penyelesaian inversi non-linier dengan menggunakan pendekatan global. Dalam hal ini penyelesaian permasalahan menggunakan jenis Very Fast Simulated Annealing (VFSA). Adapaun algoritma dalam menyelesaikan permasalahan non-linier dalam hal ini adalah data magnetotellurik dengan pendekatan global seperti pada gambar 3.3,



Gambar 3.3 Algoritma Simulated Annealing sederhana untuk inversi non-linier (Grandis, 2009)

Berbeda dengan metode Occam pemodelan inversi 1D dengan metode Simulated Annealing hanya bisa dilakukan pada kasus non-linier.

### 3.3 Parameterisasi Model

Dalam pembuatan program inversi terdapat parameter inversi yang bersifat dapat berubah. Perubahan parameter ini dimaksudkan agar dapat mengoptimalkan hasil inversi pada masing-masing metode. Parameter yang bersifat dapat berubah meliputi minimum kedalaman, maksimum kedalaman, jumlah lapisan, batasan  $\alpha$  (untuk metode Occam), maksimum iterasi, maksimum random (untuk metode Simulated Annealing), konstrain maksimum dan minimum (untuk metode Simulated Annealing), dan toleransi error.

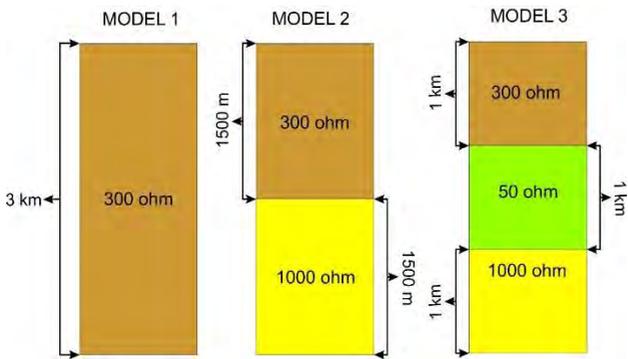
Dalam penelitian ini parameter model adalah resistivitas tiap lapisan yang akan menggambarkan variasi resistivitas terhadap kedalaman. Untuk ketebalan lapisan dibuat homogen dalam skala logaritmik sehingga ketebalan lapisan meningkat terhadap kedalaman hal ini dimaksudkan untuk mengakomodasi berkurangnya resolusi metoda MT terhadap kedalaman. Untuk awal iterasi, resistivitas tiap lapisan dibuat sama dengan rata-rata data resistivitas semu (data observasi).

### 3.4 Pengumpulan Data

Data yang digunakan merupakan data hasil pengukuran yang dilakukan oleh PT. Elnusa Tbk. di lapangan panas bumi X atau dengan kata lain merupakan data sekunder. Data yang digunakan merupakan data magnetotellurik hasil pengolahan yang berupa file dengan *extension* .edi. Jumlah data yang digunakan dalam penelitian adalah tujuh data yang berada pada satu lintasan yang sama. Pada kurva resistivitas dan fase hasil pengukuran terdapat dua jenis kurva yaitu XY dan YX. Selain kurva XY dan YX akan dibuat kurva *invariant* dari kurva XY dan YX. Sehingga data yang digunakan pada satu titik pengukuran ada tiga jenis.

### 3.5 Validasi

Validasi merupakan suatu cara untuk membuktikan keakuratan metode yang digunakan dalam inversi dan pemodelan kedepan. Validasi dilakukan dengan dua cara yaitu dibandingkan dengan data sintetik dan dengan hasil pengolahan konvensional (penampang 1-D). Validasi pertama dilakukan dengan menggunakan data sintetik. Data sintetik didapatkan dari hasil pemodelan kedepan model sintetik yang ditunjukkan oleh gambar 3.4. Model sintetik dibuat menjadi tiga jenis dimana model 1 mewakili model homogen, model 2 mewakili model heterogen dengan dua lapisan, dan model 3 mewakili model heterogen dengan tiga lapisan dimana lapisan kedua lebih rendah dibandingkan lapisan pertama dan ketiga hal ini dilakukan untuk melihat hasil inversi terhadap model yang non-linier. Apabila validasi pertama menyatakan bahwa model hasil inversi sudah mendekati model sintetik maka program sudah dapat digunakan untuk proses inversi pada data magnetotellurik dari lapangan. Validasi kedua terhadap inversi data lapangan dilakukan dengan membandingkan hasil inversi dari program yang dibuat dengan program konvensional.



Gambar 3.4 Model sintetik

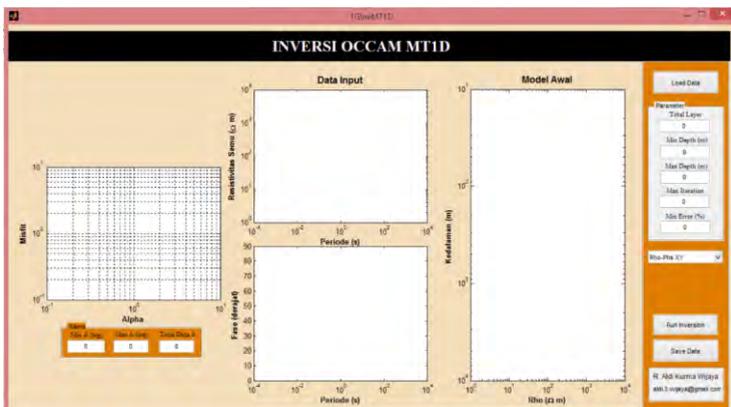
# BAB IV PEMBAHASAN

## 4.1 Program Inversi

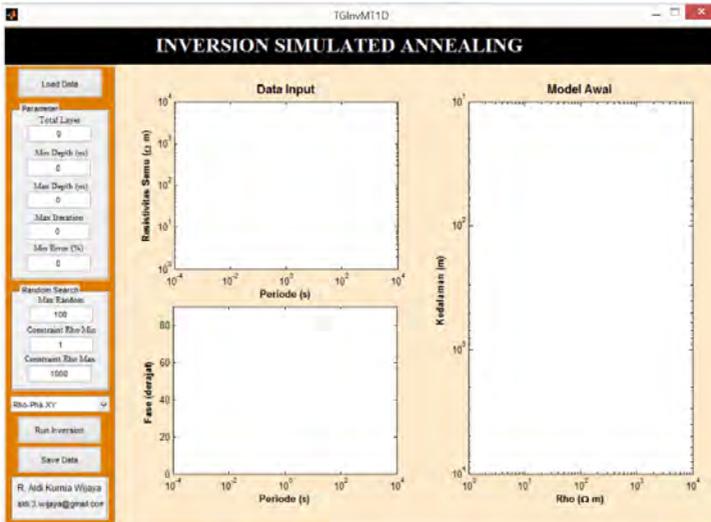
Program inversi dibuat dengan menggunakan program Matlab, program yang telah dibuat meliputi pemodelan kedepan metode magnetotellurik 1D, inversi metode Simulated Annealing, inversi metode Occam, program untuk membaca file dengan *extension* .edi, interpolasi penampang 1D hasil inversi dan *User Guide Interface*. Dalam penelitian ini tidak hanya dibuat program inversi saja, tetapi dibuat berbagai macam program yang dapat mendukung proses inversi yang dilakukan, hal ini bertujuan agar hasil inversi menjadi optimum. Kemudian pembuatan *User Guide Interface* diharapkan agar program dapat digunakan dengan mudah oleh pengguna lain (*User friendly*) dan dapat digunakan dalam proses pembelajaran di kampus sebagai alternatif pengganti program inversi 1D metode magnetotellurik yang berbayar. Seluruh program yang dibuat kemudian diintegrasikan dengan program utama yang bernama TGMT1D. Tampilan hasil pembuatan program utama diperlihatkan oleh gambar 4.1 sampai gambar 4.3.



Gambar 4.1 Menu utama program



Gambar 4.2 Tampilan program inversi dengan metode Occam



Gambar 4.3 Tampilan program inversi dengan metode Simulated Annealing

Untuk parameter yang dimasukkan pada setiap metode inversi ada yang berbeda sehingga tampilan program inversi tidak terlalu sama. Perbedaan parameter yang dimasukkan didasarkan pada komputasi yang dilakukan setiap metode inversi, hal ini dikarenakan perbedaan pendekatan untuk mendapatkan model yang optimum.

Pada program yang telah dibuat pengguna dapat langsung membaca data dengan format .edi yang merupakan format Internasional mengenai pengolahan data magnetotellurik. Program dibuat sehingga dapat membaca komponen XY, YX, dan *invariant* yang kemudian akan di inversi sesuai dengan parameter yang dimasukkan. Parameter dibuat dapat berubah agar menyesuaikan dengan data, karena pendekatan atau proses inversi yang dilakukan akan dipengaruhi oleh parameter yang dimasukkan.

#### 4.1.1 Program Inversi Metode Simulated Annealing

Untuk program inversi dengan menggunakan metode Simulated Annealing dibuat perubahan parameter yang akan mempengaruhi komputasi yang dilakukan program. Parameter umum untuk metode Simulated Annealing dan Occam berdasarkan pengaruhnya terhadap model yang dihasilkan diperlihatkan oleh tabel 4.1.

Table 4.1 Parameter yang berpengaruh terhadap model inversi untuk metode Simulated Annealing dan Occam

Nama Parameter	Pengaruh Terhadap Model
Jumlah Lapisan	Karena ketebalan dibuat tetap secara logaritmik, sehingga semakin banyak lapisan maka semakin banyak komputasi yang dilakukan program terhadap perubahan resistivitas tiap lapisan. Semakin banyak lapisan semakin lama komputasi yang dilakukan.
Minimal Kedalaman	Komputasi model dimulai dari minimal kedalaman yang ditentukan. Dimana pengaruh resistivas terhadap hasil pemodelan kedepan (resistivitas semu dan fase) dengan kedalaman kurang dari minimal kedalaman diabaikan.
Maksimal Kedalaman	Komputasi model berakhir pada maksimal kedalaman yang ditentukan. Dimana pengaruh resistivas terhadap hasil pemodelan kedepan (resistivitas semu dan fase) dengan kedalaman lebih dari maksimal kedalaman diabaikan.
Nama Parameter	Pengaruh Terhadap Model
Maksimal Iterasi	Komputasi model berhenti ketika iterasi yang dilakukan sudah sama dengan maksimal iterasi.
Toleransi rms error	Komputasi model berhenti ketika rms error lebih kecil dibandingkan toleransi rms error.

Sedangkan untuk parameter yang dimasukkan khusus untuk komputasi metode Simulated Annealing diperlihatkan oleh tabel 4.2.

Table 4.2 Parameter yang berpengaruh terhadap model inversi untuk metode Simulated Annealing

Nama Parameter	Pengaruh Terhadap Model
Maksimal Random	Komputasi pemilihan random pada komputasi berhenti pada maksimal random ketika tidak menemukan nilai yang cocok dan dilanjutkan dengan probabilitas tertentu.
Konstrain Resistivitas Minimum	Perubahan nilai resistivitas minimum dibatasi oleh parameter konstrain resistivitas minimum.
Konstrain Resistivitas Maksimum	Komputasi model berakhir pada maksimal kedalaman yang ditentukan. Dimana pengaruh resistivas terhadap hasil pemodelan kedepan (resistivitas semu dan fase)

	dengan kedalaman lebih dari maksimal kedalaman diabaikan.
--	---

#### 4.1.2 Program Inversi Metode Occam

Sama seperti program inversi Simulated Annealing program inversi dengan menggunakan metode Simulated Annealing juga dibuat perubahan parameter yang akan mempengaruhi komputasi yang dilakukan program. Parameter umum untuk metode Simulated Annealing dan Occam telah dijelaskan sebelumnya. Sedangkan untuk parameter yang berpengaruh khusus untuk komputasi metode Occam diperlihatkan oleh tabel 4.3.

Table 4.3 Parameter yang berpengaruh terhadap model inversi untuk metode Occam

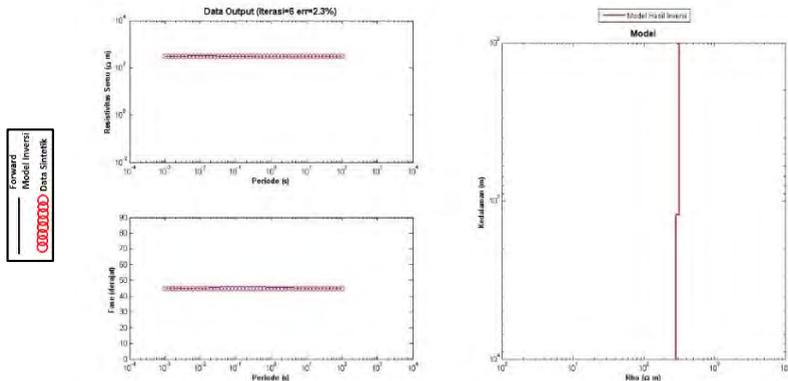
Nama Parameter	Pengaruh Terhadap Model
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	Pengambilan nilai alpha ( $\alpha$ ) minimum secara logaritmik.
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	Pengambilan nilai alpha ( $\alpha$ ) maksimum secara logaritmik.
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	Jumlah data alpha ( $\alpha$ ) dari rentan alpha ( $\alpha$ ) minimum sampai alpha ( $\alpha$ ) maksimum secara logaritmik.

## 4.2 Validasi Program Pada Data Sintetik

Validasi dilakukan terhadap data sintetik hasil pemodelan kedepan dari model sintetik yang diperlihatkan oleh gambar 3.4. Validasi dilakukan pada data sintetik yang sama untuk kedua metode inversi, hal ini bertujuan untuk membandingkan masing-masing respon hasil inversi.

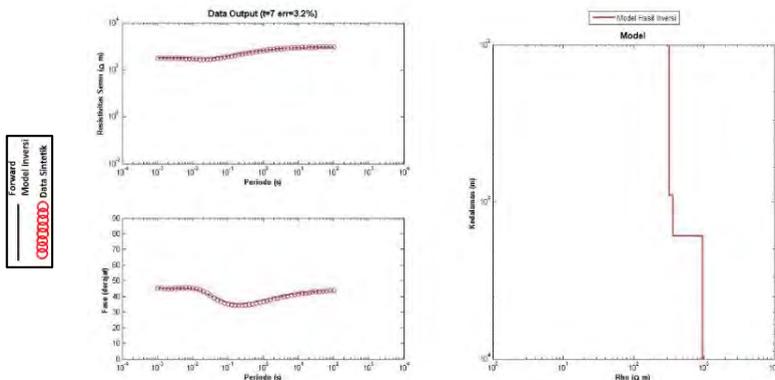
### 4.2.1 Validasi Metode Simulated Annealing

Hasil dari inversi pada ketiga model sintetik untuk metode simulated annealing ditunjukkan oleh gambar 4.4, 4.5, dan 4.6.



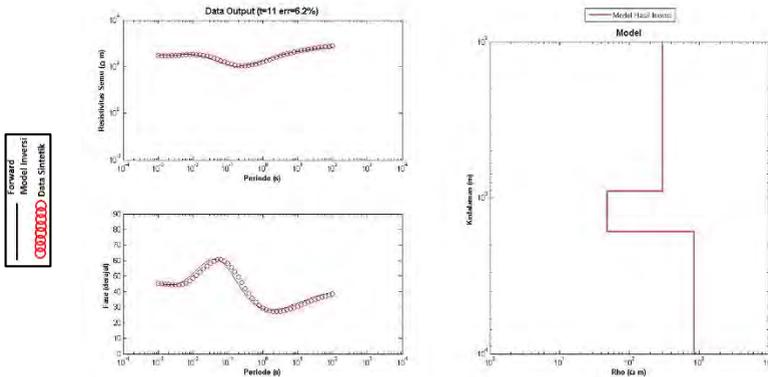
Gambar 4.4 Hasil inversi Simulated Annealing terhadap data sintetik model 1

Untuk inversi terhadap data sintetik model 1 resistivitas awal dibuat tidak *default* karena apabila di atur *default* program tidak akan menemukan hasil inversi karena rms error 0%, hal ini dikarenakan resistivitas awal adalah rata-rata data observasi. Maka dibuat resistivitas awal bernilai 400 ohm, hasil dari inversi menunjukkan nilai resistivitas sekitar 300 Ohm dengan rms error sebesar 2.3% pada iterasi ke-6.



Gambar 4.5 Hasil inversi Simulated Annealing terhadap data sintetik model 2

Untuk hasil inversi terhadap data sintetik model 2 didapatkan model dengan resistivitas 300 Ohm dan 1000 Ohm, perubahan signifikan terjadi pada kedalaman sekitar 1600 m. Apabila dilihat dari rms error menunjukkan nilai yang cukup kecil yaitu sebesar 3.2% pada iterasi ke-7.



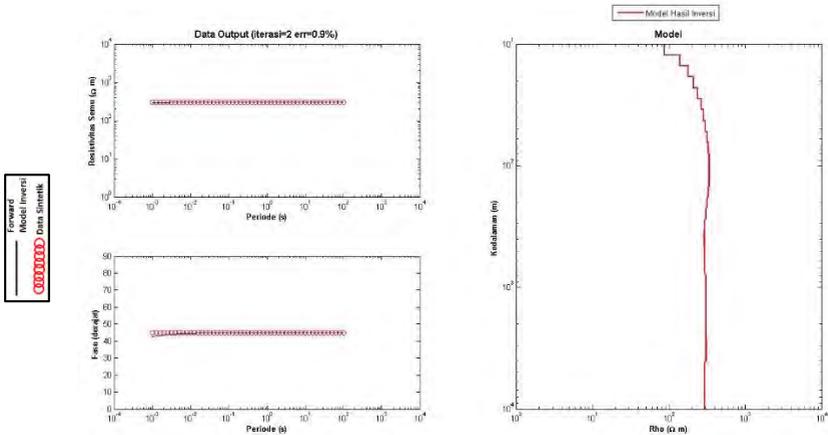
Gambar 4.6 Hasil inversi Simulated Annealing terhadap data sintetik model 3

Untuk hasil inversi terhadap data sintetik model 3 didapatkan model dengan resistivitas 300 Ohm, 50 Ohm dan 900 Ohm, perubahan terjadi pada kedalaman 900 m dan sekitar 1700 m. Apabila dilihat dari rms error menunjukkan nilai sebesar 6.2% pada iterasi ke-11.

Dari ketiga model yang telah dilakukan inversi dengan menggunakan metode Simulated Annealing didapatkan rms error kurang dari 10% dan model hasil inversi sesuai dengan model sintetik. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa program inversi dengan menggunakan metode Simulated Annealing dapat digunakan dalam inversi data magnetotellurik yang sebenarnya. Dimana hasil inversi pada data magnetotellurik diharapkan dapat mendekati kondisi bawah permukaan yang sebenarnya.

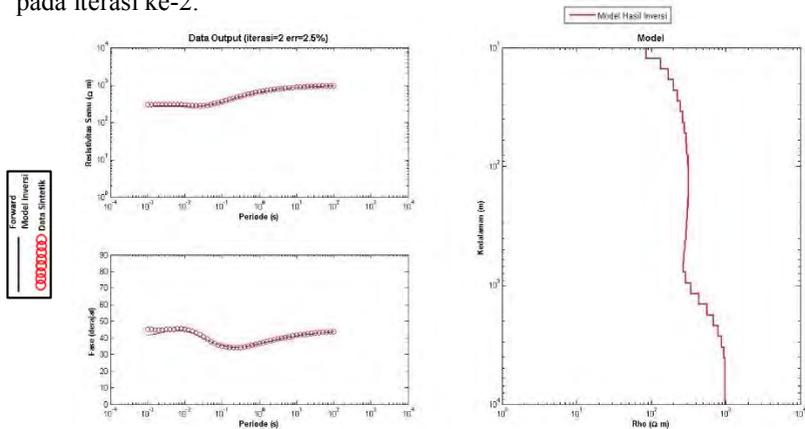
#### 4.2.2 Validasi Metode Occam

Hasil dari inversi pada ketiga model sintetik untuk metode simulated annealing ditunjukkan oleh gambar 4.7, 4.8, dan 4.9.



Gambar 4.7 Hasil inversi Occam terhadap data sintetik model 1

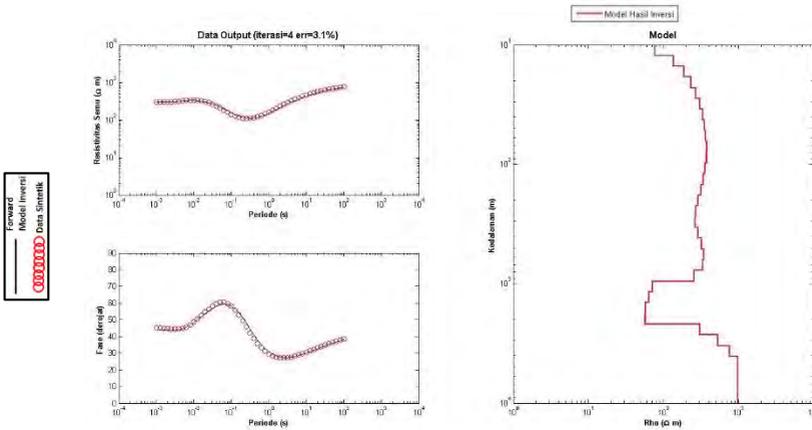
Untuk hasil inversi terhadap data sintetik model 1 didapatkan model dengan resistivitas awal 80 Ohm pada kedalaman 10 meter yang naik hingga 300 ohm pada kedalaman 80 meter dan cukup konstan berada di 300 Ohm. Apabila dilihat dari rms error menunjukkan nilai yang sangat kecil yaitu sebesar 0.9% pada iterasi ke-2.



Gambar 4.8 Hasil inversi Occam terhadap data sintetik model 2

Untuk hasil inversi terhadap data sintetik model 2 didapatkan model dengan resistivitas awal dari 90 Ohm pada kedalaman 10 meter yang naik hingga 300 ohm pada kedalaman 80 meter kemudian naik kembali sampai 1000 ohm

pada kedalaman 3000 meter. Apabila dilihat dari rms error menunjukkan nilai yang cukup kecil sebesar 2.5% pada iterasi ke-2.



Gambar 4.9 Hasil inversi Occam terhadap data sintetik model 3

Untuk hasil inversi terhadap data sintetik model 3 didapatkan model dengan resistivitas awal dari 80 Ohm pada kedalaman 10 meter yang naik hingga 300 ohm pada kedalaman 50 meter kemudian turun menjadi 50 Ohm pada kedalaman 1000 meter dan naik kembali menjadi 1000 Ohm pada kedalaman 3000 m. Apabila dilihat dari rms error menunjukkan nilai yang cukup kecil sebesar 3.1% pada iterasi ke-4.

Dari ketiga model yang telah dilakukan inversi dengan menggunakan metode Occam didapatkan rms error kurang dari 5% dan model hasil inversi cukup sesuai dengan model sintetik. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa program inversi dengan menggunakan metode Occam dapat digunakan dalam inversi data magnetotellurik yang sebenarnya. Dimana hasil inversi pada data magnetotellurik diharapkan dapat mendekati kondisi bawah permukaan yang sebenarnya.

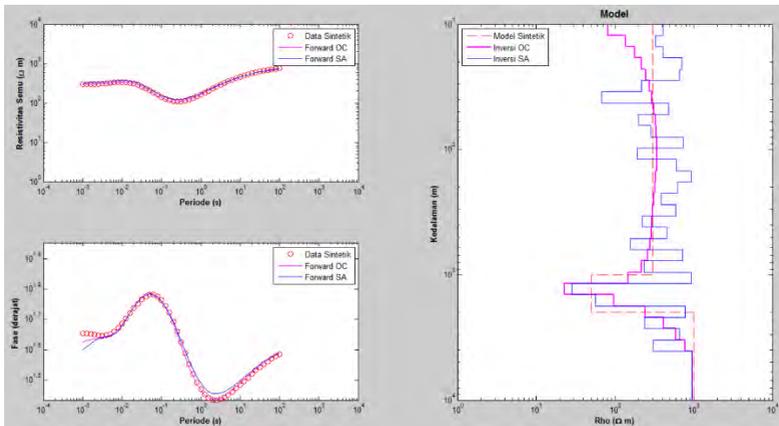
### 4.3 Analisa Metode Inversi

Analisa dilakukan terhadap hasil inversi dengan metode Simulated Annealing dan Occam pada data sintetik model 3 dengan menggunakan parameter yang sama pada setiap metode. Parameter sengaja disamakan untuk melihat respon dari masing-masing komputasi yang dilakukan setiap metode sehingga dapat dianalisa kelebihan dan kekurangan dari masing-masing metode. Digunakan dua jenis parameter yang berbeda seperti diperlihatkan oleh tabel 4.1.

Table 4.4 Parameter inversi yang digunakan

Nama Parameter	Parameter Pertama	Parameter Kedua
Jumlah Lapisan	30	5
Kedalaman Minimum	10	300
Kedalaman Maksimum	5000	3000
RMS Error	5%	5%

Berdasarkan hasil inversi yang telah dilakukan terhadap dua parameter diatas didapatkan hasil yang berbeda untuk masing-masing parameter dan metode. Hasil inersi dengan parameter pertama ditunjukkan oleh gambar 4.10, sedangkan untuk parameter kedua ditunjukkan 4.14.



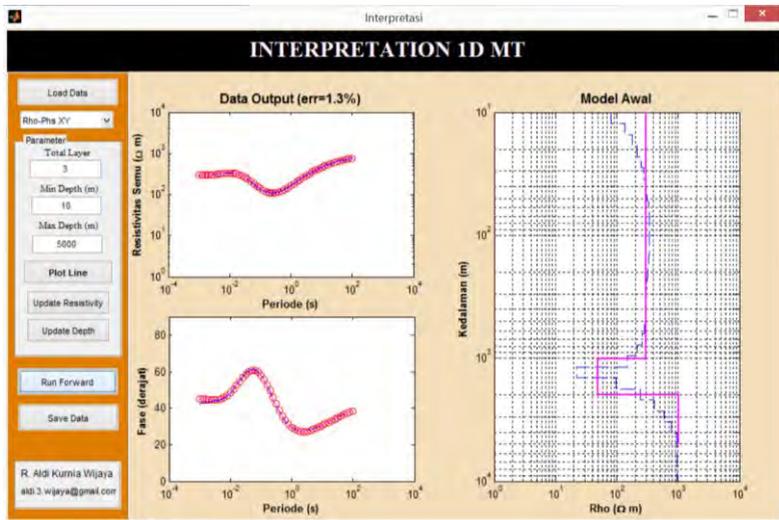
Gambar 4.10 Model hasil inversi dengan parameter pertama

Dari hasil inversi dengan parameter pertama terlihat metode Occam lebih mendekati dengan model sintetik dibandingkan dengan metode Simulated Annealing. Hal ini dikarenakan metode Occam melakukan pendekatan numerik (pendekatan linier) terhadap model sintetik dengan evaluasi model berupa misfit, faktor *smoothing*, partubisasi model, dan rms error. Tetapi Simulated Annealing melakukan pendekatan global dengan metode *random guide search*, dalam hal ini pencarian model ideal dengan mencari model secara random dengan evaluasi model berupa rms error saja. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi model yang dihasilkan oleh setiap metode.

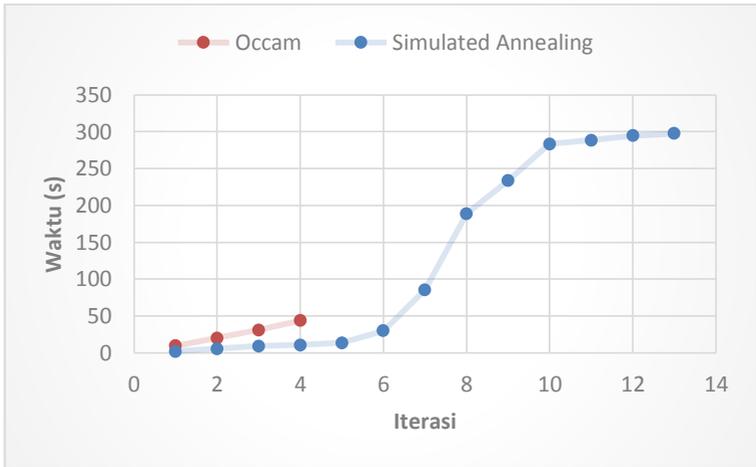
Pertama beban parameter yang besar dimana program harus melakukan komputasi dengan jumlah lapisan 30, untuk metode Occam terbantu karena adanya faktor evaluasi model yang lebih banyak dibandingkan metode Simulated

Annealing sehingga model tidak terlalu bebas berubah dan mengikuti data sintetik. Sedangkan metode Simulated Annealing hanya dibatasi oleh minimal konstrain resistivitas, maksimum konstrain resistivitas, dan rms error sehingga perubahan model yang terjadi lebih bebas dan program hanya mencari nilai rms error terendah pada setiap iterasi. Kedua pada metode Occam terdapat faktor *smoothing* sehingga menjaga model hasil inversi tidak berbeda jauh antar lapisan sebelum dan setelahnya. Sedangkan metode Simulated Annealing tidak memiliki faktor *smoothing* tersebut yang menjadikan model hasil inversi lebih kasar pada lapisan sebelum dan setelahnya. Terakhir adalah pengaruh dari sifat non-linier metode magnetotellurik dimana adanya ambiguitas hasil *forward modelling* hal ini terlihat dari nilai rms error yang dibawah 5% tetapi model hasil inversi Simulated Annealing kurang sesuai dengan model sintetik.

Walaupun metode Occam lebih baik dibandingkan metode Simulated Annealing pada parameter pertama, model yang dihasilkan selanjutnya harus dilakukan interpretasi agar mendapatkan model ideal, oleh karena itu dibuat program pembantu pada penelitian ini yang dikhususkan untuk interpretasi metode Occam seperti yang diperlihatkan oleh gambar 4.11. Hal ini dikarenakan metode Occam adalah pengembangan metode Levenberg-marquardt dengan penambahan faktor *smoothing*, yang menyebabkan model berbentuk lebih halus dengan toleransi  $\alpha$ .

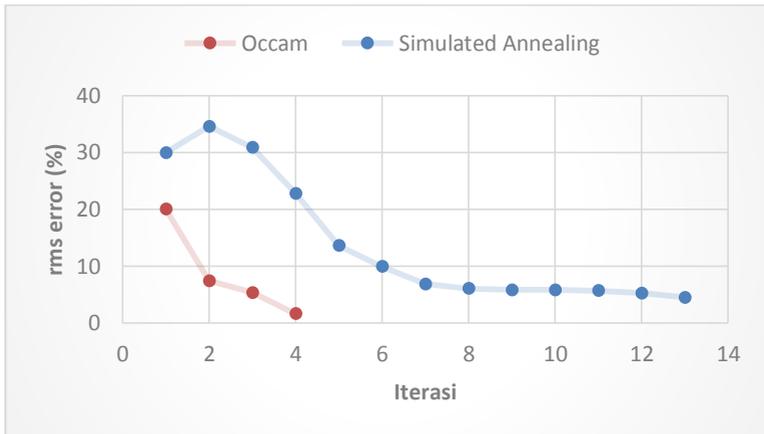


Gambar 4.11 Hasil interpretasi model inversi Occam



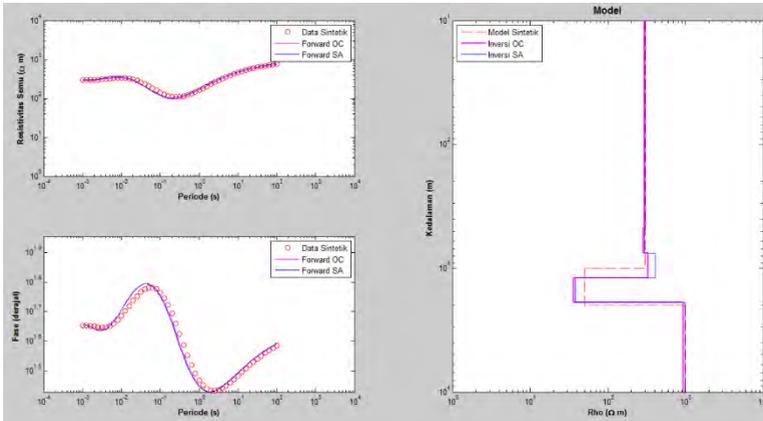
Gambar 4.12 Grafik perbandingan waktu dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter pertama

Dari hasil perbandingan waktu dengan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan rms error kurang dari 5% terhadap data sintetik. Terlihat bahwa waktu yang dibutuhkan metode Simulated Annealing lebih lama dibandingkan oleh metode Occam. Selain waktu yang dibutuhkan jumlah iterasi untuk metode Simulated Annealing juga lebih banyak dibandingkan oleh metode Occam. Hal ini disebabkan perbedaan pendekatan yang dilakukan kedua metode.



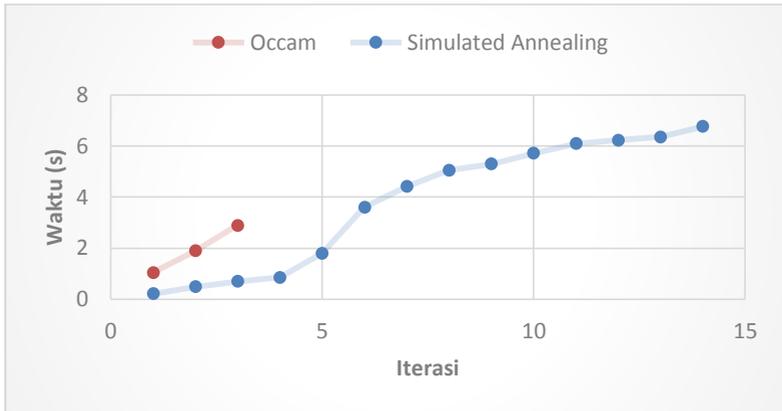
Gambar 4.13 Grafik perbandingan rms error dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter pertama

Dari hasil perbandingan rms error dengan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan rms error kurang dari 5% terhadap data sintetik. Apabila dilihat dari rms error, tebakan model pertama metode Occam lebih baik dibandingkan metode Simulated Annealing diperlihatkan dengan rms error yang lebih kecil. Hal ini disebabkan perbedaan pendekatan yang dilakukan kedua metode.



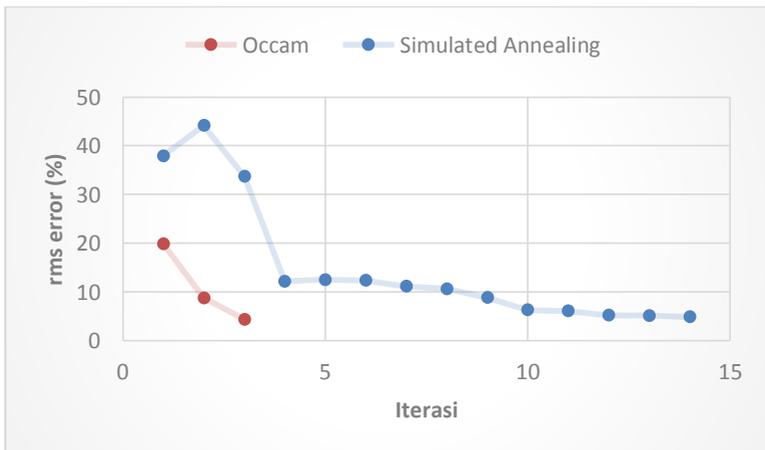
Gambar 4.14 Model hasil inversi dengan parameter kedua

Dari hasil inversi dengan parameter kedua terlihat metode Occam dan metode Simulated Annealing sudah mendekati model sintetik. Hal ini berbeda dengan parameter pertama, karena pada parameter kedua jumlah lapisan dibuat lebih sedikit dengan batasan minimum kedalaman dinaikan sehingga berdampak baik untuk metode Simulated Annealing.



Gambar 4.15 Grafik perbandingan waktu dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter kedua

Dari hasil perbandingan waktu dengan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan rms error kurang dari 5% terhadap data sintetik. Terlihat bahwa waktu yang dibutuhkan metode Simulated Annealing lebih lama dibandingkan oleh metode Occam. Selain waktu yang dibutuhkan jumlah iterasi untuk metode Simulated Annealing juga lebih banyak dibandingkan oleh metode Occam. Hal ini disebabkan perbedaan pendekatan yang dilakukan kedua metode.



Gambar 4.16 Grafik perbandingan rms error dengan jumlah iterasi dalam proses inversi untuk parameter kedua

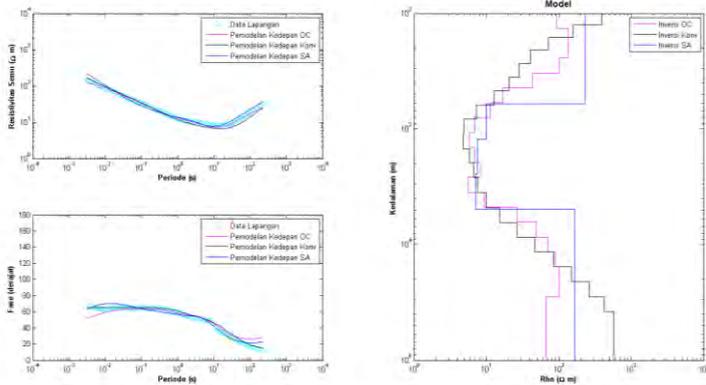
Dari hasil perbandingan rms error dengan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan rms error kurang dari 5% terhadap data sintetik. Apabila dilihat dari rms error, tebakan model pertama metode Occam masih lebih baik dibandingkan metode Simulated Annealing diperlihatkan dengan rms error yang lebih kecil walaupun adanya perubahan parameter. Hal ini disebabkan perbedaan pendekatan yang dilakukan kedua metode.

#### **4.4 Validasi Dengan Program Konvensional (WinGlink)**

Tahapan selanjutnya dari penelitian adalah melakukan inversi terhadap data lapangan yang kemudian divalidasi dengan program konvensional dalam hal ini digunakan program WinGlink ketika melakukan penelitian di PT. Elnusa Tbk. Validasi dilakukan untuk melihat model hasil inversi dari masing-masing program, untuk inversi dengan metode Occam pada program konvensional dan WinGlink digunakan parameter yang sama sehingga dapat dianalisa perbedaan model yang dihasilkan, sedangkan untuk metode Simulated Annealing parameter diatur berbeda agar model yang dihasilkan baik dengan rms error yang rendah (kurang dari 10%) hal ini karena kekurangan dari metode Simulated Annealing yang telah dibahas pada sub bab 4.3.

Parameterisasi inversi untuk jumlah lapisan dibuat 20 lapisan untuk metode Occam sedangkan untuk metode Simulated Annealing menyesuaikan agar hasil inversi yang dihasilkan baik dengan rms error yang rendah. Untuk parameter jumlah iterasi pada kedua jenis metode inversi disesuaikan dengan model hasil inversi yang dihasilkan dimana model yang dihasilkan memiliki model yang baik, masuk akal, dengan nilai rms error kurang dari 10%. Untuk metode Occam (dengan program yang telah dibuat dan konvensional) minimal kedalaman dan maksimal kedalaman mengikuti dari perhitungan *skindepth* dari nilai resistivitas semu dan periode data pengukuran, sedangkan untuk metode Simulated Annealing menyesuaikan dengan jumlah layer sehingga dihasilkan model yang baik. Dalam hal ini nilai rms error tidak dijadikan sebagai pembanding antara program konvensional dengan program TGMT1D karena pada program konvensional rms error dari hasil inversi metode Occam tidak diperlihatkan dan tidak dapat dikeluarkan, sehingga parameterisasi program konvensional mengikuti rms error yang didapat dari program TGMT1D.

Analisa dilakukan terhadap grafik model inversi, pemodelan kedepan resistivitas semu dan pemodelan kedepan fase. Analisa ini dilakukan dari model inversi dan pemodelan kedepan yang dihasilkan, karena tidak ada dapat pendukung lainnya dalam kasus ini.



Gambar 4.17 Hasil inversi pada titik ITS7

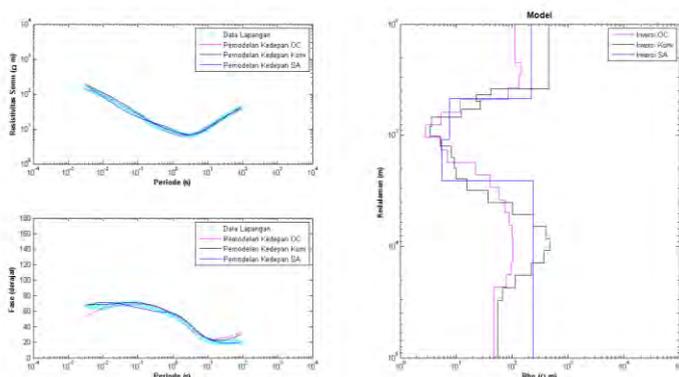
Tabel 4.5 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS7

Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	20	20	5
Kedalaman Minimum	171	171	200
Kedalaman Maksimum	60.000	60.000	10.000
Maksimal Iterasi	10	10	125
Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2	Maksimal Random	100
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	2	Konstrain Resistivitas Minimum	1
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	1000	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Lokal		

Dari hasil inversi pada titik ITS7 terlihat perbedaan yang menarik dari model hasil inversi pada kedalaman 4.000 – 40.000 m dimana hasil inversi menunjukkan model dengan resistivitas yang naik secara signifikan mencapai

kisaran 30.000 ohm.m. Apabila pada kondisi sebenarnya hamper tidak mungkin terdapat batuan dengan resistivitas mencapai 30.000 ohm.m. Sehingga apabila dilihat dari model inversi yang dihasilkan program TGMT1D menunjukkan hasil yang lebih baik.

Pada grafik resistivitas semu hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan hasil yang baik. Sedangkan pada grafik fase hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode rendah dari metode Occam dengan program TGMT1D dimana grafiknya menurun, hal ini diakibatkan dari model inversi pada kedalaman dangkal (100-400 m) yang kurang sesuai. Sedangkan untuk periode tinggi hasil pemodelan kedepan dari model inversi metode Simulated Annealing menghasilkan grafik yang lebih mendekati data hasil pengukuran.



Gambar 4.18 Hasil inversi pada titik ITS6

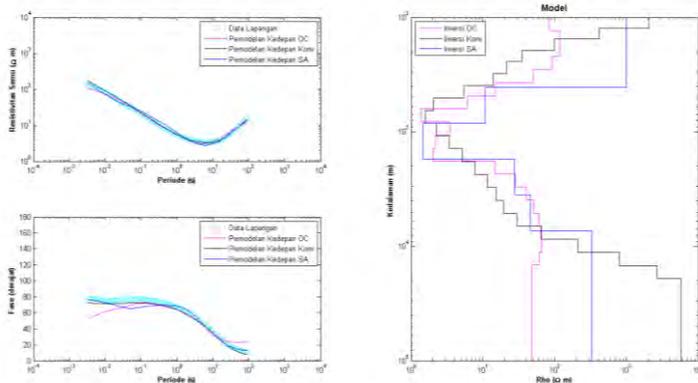
Tabel 4.6 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS6

Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	20	20	4
Kedalaman Minimum	171	171	200
Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Kedalaman Maksimum	30.000	30.000	6.000
Maksimal Iterasi	7	7	125
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2	Maksimal Random	100

Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	2	Konstrain Resistivitas Minimum	1
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	250	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Lokal		

Dari hasil inversi pada titik ITS6 hanya terlihat perbedaan minor pada setiap model inversi yang dihasilkan pada kedalaman dangkal (100-300 m) dan pada lapisan terakhir untuk metode Occam dengan Simulated Annealing, perbedaan ini dapat mempengaruhi dari hasil pemodelan kedepan terhadap model inversi seperti yang diperlihatkan pada grafik resistivitas semu dan fase. Tetapi secara keseluruhan hasil dari setiap inversi menunjukkan hasil yang baik

Pada grafik resistivitas semu hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan hasil yang baik. Pada grafik fase hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode rendah dari metode Occam dengan program TGMT1D dimana grafiknya menurun, hal ini diakibatkan dari model inversi pada kedalaman dangkal (100-400 m) yang kurang sesuai. Sedangkan untuk periode tinggi hasil pemodelan kedepan dari model inversi metode Simulated Annealing menghasilkan grafik yang lebih mendekati data hasil pengukuran, hal ini diakibatkan dari model inversi pada lapisan terakhir dari 20.000 m.



Gambar 4.19 Hasil inversi pada titik ITS5

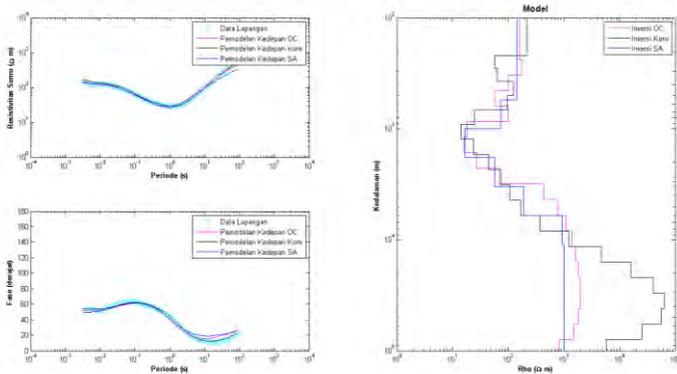
Tabel 4.7 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS5

Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	20	20	6
Kedalaman Minimum	100	100	200
Kedalaman Maksimum	19.000	19.000	15.000
Maksimal Iterasi	7	7	100
Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2.25	Maksimal Random	100
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	1.75	Konstrain Resistivitas Minimum	1
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	1000	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Global		

Pada titik ITS5 parameter kedalaman minimum untuk metode Occam tidak dihitung dengan persamaan *skindepth* hal ini karena solusi model inversi yang diberikan memiliki model yang kurang baik.

Dari hasil inversi pada titik ITS5 terlihat perbedaan yang cukup signifikan pada lapisan awal dan akhir. Dimana hasil inversi untuk lapisan awal dari metode Occam resistivitas awal yaitu 200 Ohm.m sedangkan untuk metode Occam dengan program Konvensional memiliki resistivitas awal yang sangat tinggi sekitar 2.000 ohm.m dan untuk metode Simulated Annealing memiliki resistivitas awal sekitar 1.000 ohm.m. Kemudian untuk lapisan akhir dari kedalaman 10.000 meter hasil inversi untuk lapisan awal dari metode Occam resistivitas akhir yaitu 50 Ohm.m sedangkan untuk metode Occam dengan program Konvensional memiliki resistivitas akhir yang sangat tinggi sekitar 6.000 ohm.m dan untuk metode Simulated Annealing memiliki resistivitas awal sekitar 300 ohm.m. Model inversi ini diterima karena pada dasarnya analisa dilakukan hanya sampai kedalaman antara 5.000 – 8.000 meter sehingga model inversi lebih dari kedalaman 8.000 meter dapat diabaikan. Selain itu model inversi pada kedalaman 200 – 8.000 meter menunjukkan hasil yang saling mendekati sehingga model diterima untuk analisa.

Pada grafik resistivitas semu hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan hasil yang baik. Karena terjadi perbedaan pada lapisan awal dan akhir menyebabkan grafik fase untuk ketiga metode cukup berbeda pada periode rendah dan periode tinggi.



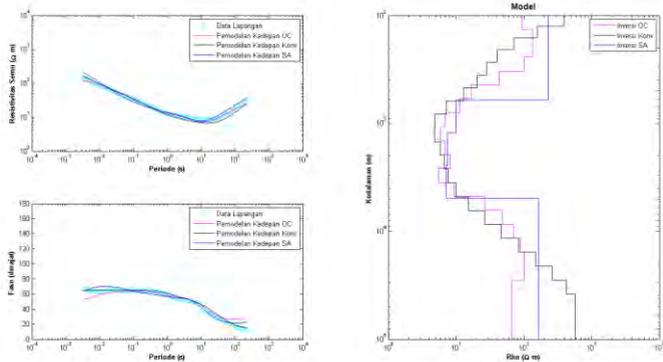
Gambar 4.20 Hasil inversi pada titik ITS4

Tabel 4.8 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS4

Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	20	20	7
Kedalaman Minimum	171	171	300
Kedalaman Maksimum	110.000	110.000	20.000
Maksimal Iterasi	7	7	100
Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2	Maksimal Random	100
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	2	Konstrain Resistivitas Minimum	1
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	1000	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Global		

Dari hasil inveri pada titik ITS4 hanya terlihat perbedaan pada model inversi konvensional dengan program yang telah dibuat pada kedalaman lebih dari 10.000 m dimana hasil inversi menunjukan model dengan resistivitas yang naik secara signifikan mencapai kisaran 70.000 ohm.m. Apabila pada kondisi sebenarnya hamper tidak mungkin terdapat batuan dengan resistivitas mencapai 70.000 ohm.m. Sehingga apabila dilihat dari model inversi yang dihasilkan program TGMT1D menunjukkan hasil yang lebih baik.

Pada grafik resistivitas semu hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode tinggi dimana grafik dari metode Simulated Annealing lebih rendah dibandingkan data pengukuran. Pada grafik fase hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode tinggi dimana hasil metode Occam (konvensional dan program yang telah dibuat) lebih tinggi dibandingkan data pengukuran.



Gambar 4.21 Hasil inversi pada titik ITS3

Tabel 4.9 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS3

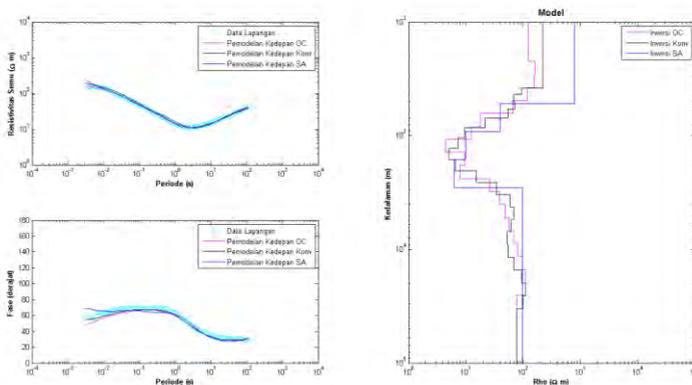
Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	20	20	5
Kedalaman Minimum	100	100	300
Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Kedalaman Maksimum	38.000	38.000	5.000
Maksimal Iterasi	7	7	125
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2	Maksimal Random	100

Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	2	Konstrain Resistivitas Minimum	1
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	1000	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Global		

Pada titik ITS3 parameter kedalaman minimum untuk metode Occam tidak dihitung dengan persamaan *skindepth* hal ini karena solusi model inversi yang diberikan memiliki model yang kurang baik.

Dari hasil inversi pada titik ITS3 hanya terlihat perbedaan kecil pada lapisan awal dan akhir. Untuk lapisan awal tidak terlalu memiliki perbedaan yang besar dibandingkan dengan lapisan akhir. Tetapi untuk lapisan akhir pada akhirnya tidak akan mempengaruhi analisa yang akan dilakukan karena analisa dilakukan hanya sampai kedalaman antara 5.000 – 8.000 meter.

Pada grafik resistivitas semu hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan hasil yang cukup sama dan mendekati data hasil pengukuran. Sedangkan pada grafik fase hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode rendah dari metode Occam dengan program TGMT1D dimana grafiknya menurun. Sedangkan untuk periode tinggi hasil pemodelan kedepan dari model inversi metode Simulated Annealing menghasilkan grafik yang lebih mendekati data hasil pengukuran.



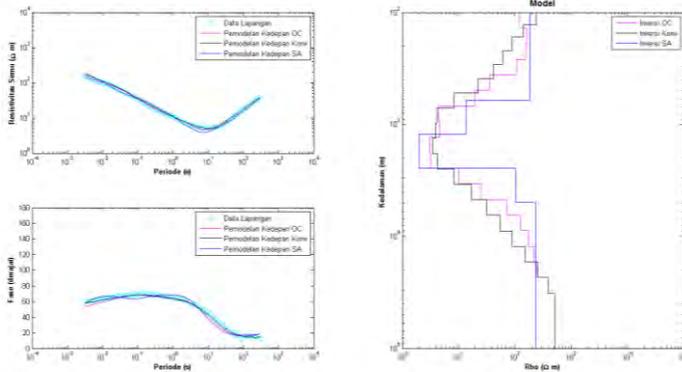
Gambar 4.22 Hasil inversi pada titik ITS2

Tabel 4.10 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS2

Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	20	20	5
Kedalaman Minimum	171	171	300
Kedalaman Maksimum	33.000	33.000	10.000
Maksimal Iterasi	6	6	125
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2	Maksimal Random	100
Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	2	Konstrain Resistivitas Minimum	1
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	1000	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Global		

Dari hasil inversi pada titik ITS2 hanya terlihat perbedaan kecil pada lapisan awal dari kedalaman 171 – 400 m dimana hasil inversi dari metode Simulated Annealing memiliki nilai resistivitas yang lebih besar dibandingkan dengan metode Occam dengan nilai sekitar 800 ohm.m. Untuk model hasil inversi lebih dari 400 m memiliki hasil yang sama untuk setiap inversi.

Pada grafik resistivitas semu hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode tinggi dimana grafik dari metode Simulated Annealing lebih rendah dibandingkan data pengukuran. Pada grafik fase hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan perbedaan pada periode tinggi dimana hasil metode Occam (konvensional dan program yang telah dibuat) lebih tinggi dibandingkan data pengukuran.



Gambar 4.23 Hasil inversi pada titik ITS1

Tabel 4.11 Parameter inversi yang digunakan pada titik ITS1

Nama Parameter	Occam	Occam Konvensional	Simulated Annealing
Jumlah Lapisan	18	18	5
Kedalaman Minimum	100	100	300
Kedalaman Maksimum	32.000	32.000	10.000
Maksimal Iterasi	3	3	100
Nama Parameter	Occam	Nama Parameter	Simulated Annealing
Minimum Alpha ( $\alpha$ )	-2	Maksimal Random	100
Maksimum Alpha ( $\alpha$ )	2	Konstrain Resistivitas Minimum	5
Jumlah Alpha ( $\alpha$ )	1000	Konstrain Resistivitas Maksimum	1000
Pemilihan Minimum Misfit Alpha ( $\alpha$ )	Global		

Pada titik ITS1 parameter kedalaman minimum untuk metode Occam tidak dihitung dengan persamaan *skinddepth*, selain itu jumlah lapisan dirubah

menjadi 18 lapisan, hal ini karena solusi model inversi yang diberikan memiliki model yang kurang baik.

Dari hasil inversi pada titik ITS1 hanya terlihat perbedaan kecil pada lapisan ke-4 metode Simulated Annealing pada kedalaman 2.500 – 4.000 m dimana hasil inversi dari metode Simulated Annealing memiliki nilai resistivitas yang lebih besar dibandingkan dengan metode Occam dengan perbedaan nilai 70 ohm.m saja. Pada grafik resistivitas semu dan fase hasil pemodelan kedepan dari model inversi menunjukkan hasil yang cukup sama dan mendekati data hasil pengukuran.

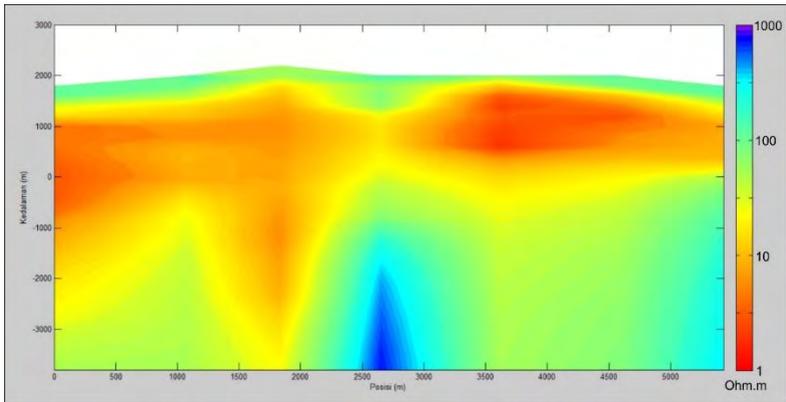
Dari hasil inversi yang telah dilakukan terlihat kekurangan dan kelebihan dari masing-masing metode inversi baik dari program TGMT1D dan program konvensional. Untuk metode Occam dengan Simulated Annealing perbedaan terlihat pada jumlah layer yang menyebabkan resistivitas dapat berubah secara signifikan untuk setiap lapisan, dimana pada metode Occam perubahan resistivitas terhadap kedalaman dilakukan secara halus untuk beberapa kasus. Apabila dilihat hasil pemodelan kedepan dari model inversi pada periode rendah dan tinggi untuk metode Simulated Annealing terlihat lebih baik, tetapi apabila dilihat kembali sebenarnya solusi model inversi ini menyebabkan grafik pada resistivitas semu dan fase lebih bergelombang dibandingkan dengan metode Occam pada keseluruhan periode.

Untuk metode Occam pada program TGMT1D pemilihan model inversi pada lapisan awal kurang baik apabila dilihat dari grafik fase pada periode awal hasil pemodelan kedepan dari model inversi, sedangkan untuk metode Occam pada program konvensional pemilihan model inversi pada lapisan awal lebih baik dalam beberapa kasus. Sementara program menggambarkan model pada periode tinggi model hasil inversi metode Occam pada program TGMT1D lebih baik dibandingkan program konvensional, terlihat pada beberapa kasus model hasil inversi dengan program konvensional dapat mencapai nilai resistivitas yang sangat tinggi, hal ini disebabkan dari pemilihan faktor *smoothing* ( $\alpha$ ) pada program. Apabila dilakukan inversi pada program konvensional tidak adanya variasi pemilihan faktor *smoothing* ( $\alpha$ ) hal ini dapat menyebabkan model hasil inversi menjadi berlebihan. Pada program TGMT1D untuk inversi metode Occam dibuat variasi pemilihan faktor *smoothing* ( $\alpha$ ), karena dari hasil penelitian yang dilakukan faktor *smoothing* ( $\alpha$ ) akan berbeda untuk setiap kasus dalam mencari model optimal.

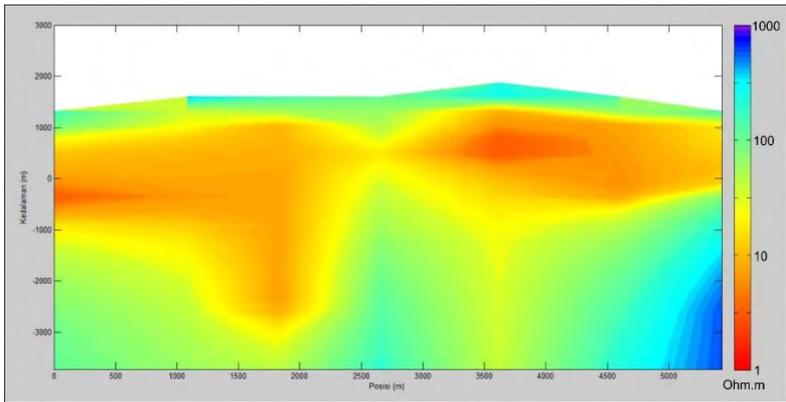
## 4.5 Analisa Penampang

Untuk melakukan analisa sistem panas bumi yang berada di lapangan X yang dalam hal ini diwakili oleh lintasan ITS1-ITS7 perlu dilakukan integrasi terlebih dahulu untuk setiap titik pengukuran. Sehingga dalam penelitian ini dibuat penampang 2D berdasarkan hasil model inversi 1D yang telah dilakukan

sebelumnya terhadap titik ITS1-ITS7. Penampang 2D dibuat untuk masing-masing metode inversi yang telah dilakukan. Dari penampang 2D yang telah didapatkan kemudian dibandingkan untuk mencari hasil yang terbaik.



Gambar 4.24 Penampang 2D berdasarkan model inversi 1D metode Occam

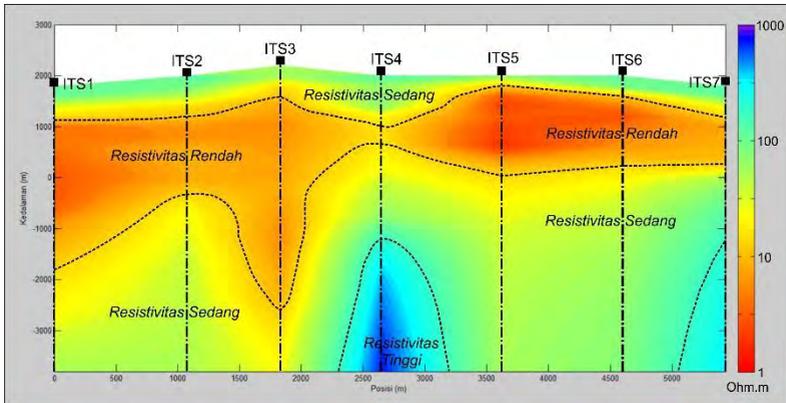


Gambar 4.25 Penampang 2D berdasarkan model inversi 1D metode Simulated Annealing

Apabila dilihat dari hasil yang ada pendampang yang dihasilkan oleh masing-masing metode inversi tidak jauh berbeda. Perbedaan terjadi dikarenakan pendekatan yang dilakukan, dalam hal tampilan metode Occam menunjukkan hasil yang lebih baik karena dalam metode Occam terdapat faktor *smoothing* yang membuat perubahan setiap lapisan tidak terlalu jauh berbeda. Sedangkan untuk metode Simulated Annealing hasil interpolasi menunjukkan hasil yang lebih kasar, hal ini dikarenakan pada metode Simulated Annealing jumlah

lapisan hanya berkisar 4-6 lapisan sehingga ketika diinterpolasi mendapatkan nilai yang lebih datar.

Karena alasan tersebut penampang 2D yang digunakan adalah penampang berdasarkan model inversi 1D dari metode Occam. Tahapan selanjutnya adalah melakukan analisa pada penampang 2D berdasarkan model inversi 1D dari metode Occam. Analisa dilakukan terhadap persebaran resistivitas pada lintasan ITS yang diperlihatkan oleh penampang 2D pada gambar 4.26.



Gambar 4.26 Penampang 2D berdasarkan model hasil inversi 1D metode Occam

Analisa di lapangan X dilakukan terhadap penampang 2D hasil inversi 1D dengan menggunakan metode Occam seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.26. Untuk lapisan paling atas adalah lapisan dengan resistivitas sedang berkisar antara 10 – 300 Ohm.m dari kedalaman sekitar 2200 m sampai 1000 m di atas permukaan air laut yang diwakili oleh warna kuning sampai hijau. Lapisan kedua merupakan lapisan dengan nilai resistivitas yang rendah berkisar antara 1 – 10 Ohm.m dari kedalaman 2500 m di atas permukaan air laut sampai kedalaman 2800 m di bawah permukaan air laut yang diwakili oleh warna merah sampai jingga. Lapisan selanjutnya adalah lapisan dengan nilai resistivitas yang sedang berkisar antara 10 -300 Ohm.m dari kedalaman 500 m di atas permukaan air laut yang diwakili oleh warna kuning sampai hijau. Kemudian terdapat lapisan dengan resistivitas tinggi berkisar antara 300 – 1000 Ohm.m yang berada pada posisi 2250 – 3200 m dan dari 5100 – 5600 m pada kedalaman 1500 – 4000 m di bawah permukaan air laut yang diwakili oleh warna biru muda sampai biru.

Apabila diamati pada kedalaman 1500 – 4000 m di bawah permukaan air laut dan posisi antara titik ITS4 dengan ITS1 terlihat anomali yang menarik. Karena data yang tersedia dalam penelitian hanya berupa data pengukuran

magnetotellurik sehingga pengamatan lebih lanjut untuk anomali tersebut belum bisa dilakukan. Apabila dilihat kembali pada titik ITS4 dan ITS1 memang data yang didapatkan memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan data lainnya, sehingga memang perlu untuk ditinjau ulang pada titik ITS4 dan ITS1 dengan bantuan data pendukung lain.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## Lampiran 1

### Program Inversi Simulated Annealing

```
%=====
%INVERSI SIMULATED ANNEALING
%=====
[rhoest,phaest] = FFTM1D( res,thi,per );
%Perhitungan misfit awal
err0=100*0.5*(mean(abs(rhoobs-
rhoest)./rhoest)+mean(abs(phaobs-phaest)./phaest));
t0=5; %temperatur awal

for t=1:maxt
    %-----
    %Patrubasi model dengan metode random guide
    searche
        for r=1:maxtt
            for j=1:length(m1)
                for i=1:n1
                    %Perubahan rho
                    while true
                        ui=random('unif',0,1);
                        yi=sign(ui-
0.5)*tt*((1+(1/tt))^abs(2*ui-1))-1);
                        m0(i)=m1(i)+yi*(maxrho-minrho);
                        if m0(i)<=maxrho && m0(i)>=minrho
                            break
                        end
                    end
                end
            end
        end
        if j==length(m1)
            aaa=sprintf('iterasi=%d ; randomstep %d
of %d;',t,r,maxtt);
            disp(aaa);
        end
    %-----

    %Patrubasi model
    res1=m0(1:n1);
    aa=1;
```

```

    for i=2:length(res1) %perhitungan
resistivitas perkedalaman dalam matriks
        resres1(aa)=res1(i-1);
        resres1(aa+1)=res1(i-1);
        aa=aa+2;
    end
    resres1(aa)=res1(length(res1));
    aa=2;
    lnres=length(resres1);

    [rhoest,phaest] = FFTM1D( res1,thi,per );
    %Perhitungan misfit kedua untuk digunakan
pada metode annealing
    err1=100*0.5*(mean(abs(rhoobs-
rhoest)./rhoest)+mean(abs(phaobs-phaest)./phaest));

    %-----
    %Patrubasi model dengan metode Annealing
    derr=err1-err0;
    p=exp(-derr/tt);

    if err1>err0
        ui=random('unif',0,1);
        if p>ui
            err0=err1;
            m1=m0;
            break
        end
    end
end
if (t>(maxt*1/100))
    tt=tt*exp(-1*t^(1/length(m0)));
else
    tt=tt;
end

if errperc <= ME
    handles.res=m1;
    handles.per=per;
    maxt=t;

```

```
        break
elseif t == maxt
    handles.res=m0;
    handles.per=per;
    break
else
end
end
```

## Lampiran 2

### Program Inversi Occam

```
%=====
%INVERSI OCCAM
%=====
%-----

%model awal
forward = FFTM1D2(res,thi,per);
rhoest=(forward(1,:));
phaest=(forward(2,:));

for t=1:maxt
    c=sprintf('%03d.jpg',t);
    Gr=feval(@FFTM1D2_rho,m,thi,per);
    Gp=feval(@FFTM1D2_pha,m,thi,per);
    G=[Gr Gp];
    %-----
    %MATRIKS JACOBIAN
    Jrho=zeros(length(rhoest),nlap);
    Jpha=zeros(length(phaest),nlap);
    I=eye(nlap);
    h=1.0e-8;

    %forward difference
    for i=1:nlap

        Jrho(:,i)=(FFTM1D2_rho(m+(h*I(:,i)).',thi,per)-
        FFTM1D2_rho(m,thi,per))/h;

        Jpha(:,i)=(FFTM1D2_pha(m+(h*I(:,i)).',thi,per)-
        FFTM1D2_pha(m,thi,per))/h;
    end

    %-----

    %Menghitung D yang ada di buku
    Drho=rhoobs'-Gr'+Jrho*m';

    L=get_l_rough(nlap+1,1); %matriks rhougness
```

```

    betas=logspace(maxA,minA,ndA); %mencari damping
    yang sesuai
    X=zeros(1,ndA);
    for i=1:ndA
        %Perubahan model

mm=inv(Jrho'*Jrho+betas(i)^2*L*L')*Jrho'*Drho;

        m0=abs(mm');
        %Menghitung data misfit
        X(:,i)=norm(rhoobs-
feval(@FFTM1D2_rho,m0,thi,per),2).^2;
    end
    %Model Baru
    [A,B]=min(X);
    beta=betas(B);
    mm=inv(Jrho'*Jrho+beta^2*L*L')*Jrho'*Drho;
    m0=abs(mm');

    %RMS error
    RMS1=100*0.5*(mean(rhoobs-
abs(feval(@FFTM1D2_rho,m0,thi,per)))...
+mean(abs(phaobs-
abs(feval(@FFTM1D2_pha,m0,thi,per)))));
    err1=100*(mean(abs(rhoobs-
feval(@FFTM1D2_rho,m0,thi,per))./feval(@FFTM1D2_rho,m
0,thi,per)));
    errperc1=100*0.5*((mean(abs(rhoobs-
feval(@FFTM1D2_rho,m0,thi,per))./feval(@FFTM1D2_rho,m
0,thi,per)))...
+(mean(abs(phaobs-
feval(@FFTM1D2_pha,m0,thi,per))./feval(@FFTM1D2_pha,m
0,thi,per)))));
    %SIGMA
    sigma1=(m0-m).^2;

    %misfit
    X1=norm(rhoobs-
feval(@FFTM1D2_rho,m0,thi,per),2).^2;

    if errperc < ME
        handles.res=m0;

```

```
        handles.per=per;  
        maxt=t;  
        close (wb);  
        break  
    end  
    close (wb);  
end
```

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

1. Program inversi dibuat menggunakan program Matlab yang saling terintegrasi dengan program pendukung dimana program utama bernama TGMT1D
2. Perbedaan inversi antara metode Occam dan Simulated Annealing terletak pada pencarian solusi model inversi, dimana metode Occam melakukan pendekatan numerik (pendekatan linier) dengan evaluasi model berupa misfit, faktor *smoothing*, partubradi model, dan rms error. Tetapi Simulated Annealing melakukan pendekatan global dengan metode *random guide search*, dalam hal ini pencarian model ideal dengan mencari model secara random dengan evaluasi model berupa rms error saja.
3. Sebaran resistivitas berdasarkan penampang hasil inversi dilapangan X terdiri dari resistivitas sedang (10-300 Ohm.m) untuk lapisan pertama, resistivitas rendah (1-10 Ohm.m) untuk lapisan kedua, resistivitas sedang (10-300 Ohm.m) untuk lapisan ketiga, dan resistivitas tinggi (300-1000 Ohm.m) untuk lapisan terakhir.
4. Metode Occam menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan metode Simulated Annealing berdasarkan solusi model, rms error (Simulated Annealing 4.481% dan Occam 1.562% untuk parameter pertama, sedangkan untuk parameter ketdua 4.86% dan 4.377%), jumlah iterasi (Simulated Annealing 13 iterasi dan Occam 4 iterasi untuk parameter pertama, sedangkan untuk parameter ketdua 14 iterasi dan 3 iterasi), dan lamanya waktu inversi (Simulated Annealing 297 detik dan Occam 43 detik untuk parameter pertama, sedangkan untuk parameter ketdua 6.7 detik dan 2.8 detik).

### 5.2 Saran

1. Pada metode Occam program perlu dikembangkan lebih lanjut terutama dalam perhiutngan model inversi pada kedalaman dangkal sehingga hasil dari inversi menjadi lebih baik dan grafik pada fase dapat naik.
2. Algoritma untuk metode Simulated Annealing perlu dikembangkan agar hasil dari proses inversi pada saat jumlah lapisan lebih dari 10 buah menghasilkan model yang baik.

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Arumsari, Anita F.S., 2007. "Model Geofisika Prospek Geothermal "Metta" Berdasarkan Studi Magnetotellurik". Skripsi, Departemen Fisika Universitas Indonesia.
- Aster, Richard C., Borchers, Brian, dan Thurber, Clifford H., 2005. "Parameter Estimation and Inverse Problems". Elsevier Inc, UK, Ch. 10.
- Berdichevsky, Mark N. dan Dmitriev, Vladimir I., 2008. "Models and Methods of Magnetotellurics". Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Colin Chen. "Robust Regression and Outlier Detection with the ROBUSTREG Procedure". SAS Institute Inc., Cary, NC, Paper 265-27.
- Constable, Steven C., Parker, Robert L., dan Constable, Catherine G. 1987. "Occam's Inversion: A practical Algorithm for Generating Smooth Model From Electromagnetic Sounding Data". *Geophysics*. Vol. 52, No. 3. P. 289-300.
- Daud, Yunus. 2010. "Diktat Kuliah : Metode Magnetotellurik (MT)". Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.
- Grandis, Hendra. 1999. "An Alternative Algorithm for One-Dimensional Magnetotelluric Response Calculation". *Geophysical Journal International*, Volume 138, Issue 3, P. 757-768.
- —. 2009. "Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika". Bandung: CV. Bhumi Printing.
- Ingber, L. 1989. "Very Fast Simulated Re-annealing". *Mathl. Comput. Modelling*. Vol. 12, No. 8, P.967-973.
- Naidu, G. D. 2012. "Magnetotellurics: Basic Theoretical Concepts". Springer-Verlag Berlin Heidelberg .XVI, Ch. 2.

- Oskooi, B. 2006. "1D Interpretation of The Magnetotellurik Data from Travale Geothermal Field in Italy". Jurnal of The Earth & Space Physics. Vol. 32, No. 2.
- Sharma V R. 1997. "Evironmental and Engineering Geophysics 1<sup>st</sup> Edition". Cambridge University Press: UK.
- Simpson, Fiona, dan Bahr, Karsten. 2005. "Practical Magnetotellurik". Cambridge University Press.
- Syaripudin, Akhmad dan Grandis, Hendra. 2001. "Inversi Data Magnetotellurik 1-D Menggunakan Metoda Simulated Annealing". KFI Vol. 12 No. 2.
- Unsworth. 2006. "Orverview of Electromagnetik Exploration Methods Geophysics".

## BIODATA PENULIS



R. Aldi Kurnia Wijaya Lahir dan besar di Cianjur, Jawa Barat. Lahir pada tanggal 28 September 1994. Riwayat pendidikan penulis SD Ibu Dewi 1 Cianjur, SMP Negeri 2 Cianjur, SMA Negeri 1 Cianjur. Penulis merupakan Vice Presiden dari SEG (Society of Exploration Geophysicists) ITS Student Chapter periode 2014-2015, Kepala Departemen Internal HMTG (Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika)

ITS periode 2014-2015. Dimana penulis berhasil membawa SEG SC ITS pada level SUMMIT dan menjadi pionir berdirinya HMTG. Penulis merupakan juara 5 dalam *Survey Design Indonesia Undergraduate Geophysics Competition (IUGC)* pada tahun 2015, finalis untuk lomba Geospasial Inovatif Nasional (LOGIN) 2015, dan lolos pedanaan PKM untuk kategori PKM-GT dan PKM-KC. Penulis pernah mendapatkan beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik (PPA) dari DIKTI selama 3 periode. Penulis telah melakukan publikasi ilmiah sebanyak 6 kali nasional dan 3 kali internasional. Untuk keterangan lebih jelas mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email : [aldi.3.wijaya@gmail.com](mailto:aldi.3.wijaya@gmail.com)