



TUGAS AKHIR - SF 141501

**INVERSI MAGNETOTELURIK SATU DIMENSI  
MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIK  
OBJEKTIF TUNGGAL DAN JAMAK**

Irwansyah Ramadhani  
NRP 1112 100 039

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.  
Sungkono, M.Si

Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - SF 091321

**ONE DIMENSIONAL MAGNETOTELLURIC  
INVERSION USING SINGLE- AND MULTI-  
OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM**

Irwansyah Ramadhani  
NRP 1112 100 039

Advisors

Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.  
Sungkono, M.Si

Department of Physics  
Faculty of Mathematics and Natural Science  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

**INVERSI MAGNETOTELURIK SATU DIMENSI  
MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIK  
OBJEKTIF TUNGGAL DAN JAMAK**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
pada  
Bidang Geofisika  
Program Studi S-1 Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**IRWANSYAH RAMADHANI  
NRP 1112100039**

**Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir**

**Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.  
NIP. 19620802 198701.1.001**

()

**Sungkono, M.Si  
NIP. 19850702 201404.1.002**

()



Surabaya, 25 Juli 2016

# INVERSI MAGNETOTELURIK SATU DIMENSI MENGUNAKAN ALGORITMA GENETIK OBJEKTIF TUNGGAL DAN JAMAK

**Nama** : Irwansyah Ramadhani  
**NRP** : 1112100039  
**Jurusan** : Fisika, FMIPA-ITS  
**Pembimbing I** : Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, S.U.  
**Pembimbing II**: Sungkono, M.Si

## **Abstrak**

*Metode Magnetotelurik (MT) dapat digunakan untuk mengestimasi parameter kelistrikan bumi (resistivitas atau konduktivitas) dengan jangkauan kedalaman yang besar. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam dunia eksplorasi mineral, tambang, dan panas bumi. Untuk mendapatkan parameter resistivitas dari data MT, dilakukan menggunakan proses inversi. Proses ini bertujuan untuk mencocokkan data resistivitas semu dan fasa yang didapatkan dari proses pengukuran dengan data perhitungan. Masalah inversi MT merupakan permasalahan inversi non-linear dan multimodal. Untuk penyelesaian masalah inversi non-linear ini, maka digunakan metode inversi yang berbasis optimum global yaitu Algoritma Genetik (AG). AG yang digunakan dalam proses inversi ini ada dua, yaitu: 1) AG untuk meminimumkan error gabungan antara resistivitas semu dan fasa dengan menggunakan fungsi pembobot dan 2) AG untuk meminimumkan error resistivitas semu dan fasa secara simultan dengan menggunakan Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). Kedua algoritma ini diaplikasikan pada data sintetik dan lapangan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa NSGA-II mampu mengestimasi*

*parameter model dari data MT lebih baik dibandingkan AG yang merupakan permasalahan objektif jamak.*

***Kata kunci :*** *Magnetotelurik, Resistivitas Semu, Fasa, Parameter Model, Algoritma Genetik, Objektif Tunggal, Objektif Jamak*

# ONE DIMENSIONAL MAGNETOTELLURIC INVERSION USING SINGLE- AND MULTI- OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM

**Name** : Irwansyah Ramadhani  
**NRP** : 1112100039  
**Major** : Physics, FMIPA-ITS  
**Advisor I** : Prof. Dr.Rer.Nat Bagus Jaya Santosa, S.U.  
**Advisor II** : Sungkono, M.Si

## **Abstract**

*Magnetotelluric (MT) method can be applied to estimate earth's electrical parameter (resistivity or conductivity) because the method can penetrate great depth. Thus, this method has been widely to explore mineral, mining, and geothermal. Inversion method can be applied to get resistivity parameter in MT data. MT inversion problem is non-linear and multi-mode problem. The non-linear inversion problem can be solved by global optimum based inversion method, such as Genetic Algorithm (GA). There are two kind of GA applied in this inversion process: 1) GA for minimization combination error between apparent resistivity and phase using weighted function and 2) GA for minimization apparent resistivity and phase error simultaneously using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) Algorithm. Both of algorithms are applied to synthetic and field data. The research results show that NSGA-II is able to estimate model parameter better than GA in multi-objective problem.*

**Key word :** *Magnetotelluric, Apparent Resistivity, Phase, Model Parameter, Genetic Algorithm, Single-Objective, Multi-Objective*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil' alamiin, segala puji dan syukur penulis ucapkan kepada ALLAH SWT atas rahmat, berkah, karunia, dan ridho-Nya yang telah di berikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

### **“Inversi Magnetotelurik Satu Dimensi Menggunakan Algoritma Genetik Objektif Tunggal dan Jamak”**

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya, penulis tidak terlepas dari orang-orang yang telah membantu dan mendukung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr.Rer.Nat Bagus Jaya Santosa, S.U. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dan memberikan arahan selama proses penyusunan Tugas Akhir.
2. Bapak Sungkono , M.Si selaku dosen pembimbing II yang telah mengajarkan, membimbing dan memberikan arahan selama proses penyusunan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng dan Bapak Dr. Rer Nat Eko, M.Si Minarto selaku ketua dan sekretariat Jurusan Fisika ITS.
4. Alwi Husein, M. Si selaku jajarannya BPLS yang telah bersedia untuk meminjamkan data BPLS kepada saya
5. Kedua orang tua tercinta, Ibu Wanty Alcaff dan Almarhum Ayah Sjahrial B. A yang telah memberikan dan mengusahakan yang terbaik untuk penulis segala doa-doa beliau sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan hingga S1 saat ini
6. Kakak Christinawati dan Almarhumah Erlinawati yang telah memberikan semangat kepada penulis saat penyusunan tugas akhir dan bantuan atas kebutuhan penulis hingga terselesaikannya studi S1 ini.

7. Nenek, Tante, dan Om yang telah memberikan dukungan pada penulis semasa studi S1
8. Dyah Ayu Daratika, seorang yang spesial yang hadir di kehidupan penulis.
9. Amalia Dwi Arifin, Laili Muflich, dan Arie Fauzi Kurniawan sebagai teman-teman terdekat penulis yang memberikan warna untuk penulis selama menempuh pendidikan S1.
10. Bapak Kiswanto sebagai laboran laboratorium Geofisika yang membantu penulis dalam menyediakan refrensi bagi penulis
11. Teman-teman dan Kakak-kakak tingkat laboratorium Geofisika FMIPA ITS yang telah membagi ilmu dan motivasinya mengenai Tugas Akhir.
12. Teman-teman MESON 2012 yang telah berjuang bersama selama 4 tahun di Fisika FMIPA ITS.
13. Pihak-Pihak lain yang tidak dapat di sebutkan satu per satu atas bantuan dan motivasinya untuk penulis.

Penulis berharap kepada para pembaca untuk memberikan kritik dan saran atas tugas akhir yang telah di susun ini guna memperbaiki dan menyempurnakan laporan Tugas Akhir ini. Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat khususnya bagi teman-teman Geofisika dan umumnya untuk semua mahasiswa. Amiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, 25 Juli 2016

IrwanSyah Ramadhani

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>COVER PAGE</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Permasalahan .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1 Pengenalan Magnetotelurik.....	7
2.2 Sinyal Magnetotelurik.....	8
2.2.1 Sinyal Magnetotelurik Frekuensi Rendah (<1 Hz) ...	9
2.2.2 Sinyal Magnetotelurik Frekuensi Tinggi (>1 Hz)....	10
2.2.3 <i>Noise</i> Sinyal Magnetotelurik.....	11
2.3 Asumsi Dasar Magnetotelurik.....	12
2.4 Persamaan Maxwell .....	13
2.5 Penetrasi Medan Elektromagnetik .....	18
2.6 Bumi Sebagai Medium <i>Uniform Half Space</i> .....	19
2.6.1 Syarat Batas.....	20
2.6.2 Impedansi Bumi <i>Uniform Half Space</i> .....	21
2.7 Bumi Sebagai Medium <i>Layered Half Space</i> .....	23

2.8	Pemodelan Geofisika.....	26
2.8.1	Pemodelan Kedepan.....	26
2.8.2	Pemodelan Kebelakang.....	27
2.9	Algoritma Genetik ( <i>Genetic Algorithm</i> ).....	28
2.9.1	Algoritma Genetik Dengan Variabel Biner.....	29
2.9.2	Algoritma Genetik Dengan Variabel Real .....	31
2.10	NSGA-II ( <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm - II</i> ).....	33
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>		<b>37</b>
3.1	Metodologi Penelitian .....	37
3.2	Pemodelan Kedapan Magnetotelurik Satu Dimensi.....	38
3.3	Inversi Algoritma Genetik Kontinu.....	41
3.4	Inversi NSGA-II.....	46
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>51</b>
4.1	<i>Forward Modelling</i> Magnetotelurik Satu Dimensi .....	51
4.1.1	Model Bumi Tiga Lapisan <i>Half Space</i> .....	51
4.1.2	Model Bumi Lima Lapisan <i>Half Space</i> .....	57
4.2	Inversi Magnetotelurik Satu Dimensi Menggunakan Algoritma Genetik.....	58
4.3	Inversi Magnetotelurik Satu Dimensi Menggunakan NSGA-II.....	67
4.4	Inversi Data Lapangan Magnetotelurik.....	77
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>		<b>83</b>
5.1	Kesimpulan .....	83
5.2	Saran.....	83
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>85</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>89</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>		<b>111</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Model lapisan bumi .....	51
Tabel 4.2 Hasil inversi dengan AG untuk tiga model bumi .....	67
Tabel 4.3 Hasil inversi dengan NSGA-II untuk tiga model bumi .....	76
Tabel 4.4 Waktu inversi AG dan NSGA-II .....	77
Tabel 4.5 Estimasi <i>search space</i> data lapangan .....	79
Tabel 4.6 Hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II .....	80

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Distorsi plasma <i>solar wind</i> oleh medan magnetik bumi (b) Garis medan magnet bumi yang menunjukkan <i>Magnetosphere</i> .....	10
Gambar 2.2 Penyebaran gelombang elektromagnetik di tempat pengukuran Magnetotelurik .....	11
Gambar 2.3 Spektrum energi sinyal Magnetotelurik .....	12
Gambar 2.4 Hubungan hukum Faraday dan hukum Ampere .....	14
Gambar 2.5 Medium <i>half space</i> homogen <i>isotropic</i> .....	18
Gambar 2.6 Medium berlapis <i>half space</i> homogen <i>isotropic</i> .....	23
Gambar 2.7 Proses <i>forward modelling</i> .....	27
Gambar 2.8 Proses <i>inverse modelling</i> .....	28
Gambar 2.9 Analogi Algoritma Genetik dengan variabel biner...	30
Gambar 2.10 Diagram alir Algoritma Genetik kontinu.....	33
Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian MT satu dimensi .....	37
Gambar 3.2 Diagram alir pemodelan kedepan Magnetotelurik satu dimensi .....	39
Gambar 3.3 Model sintetik dengan tiga lapisan (a) resistif diantar konduktif (b) konduktif diantar resistif .....	40
Gambar 3.4 Model sintetik dengan lima lapisan , resistif-konduktif-resistif-konduktif-resistif.....	40

Gambar 3.5 Diagram alir inversi Magnetotelurik satu dimensi dengan Algoritma Genetik Kode Real .....	42
Gambar 3.6 Diagram alir inversi Magnetotelurik satu dimensi dengan NSGA-II .....	49
Gambar 4.1 <i>Forward modelling</i> tiga lapisan, konduktif di antara resistif .....	52
Gambar 4.2 <i>Forward modelling</i> tiga lapisan, resistif di antara konduktif.....	53
Gambar 4.3 Penetrasi kedalaman untuk model tiga lapis, a) konduktif diantar resistif (b) resistif di antara konduktif.....	56
Gambar 4.4 <i>Forward modelling</i> lima lapisan, resistif-konduktif-resistif-konduktif-resistif .....	57
Gambar 4.5 Penetrasi kedalaman untuk model lima lapisan, resistif-konduktif-resistif-konduktif-resistif .....	58
Gambar 4.6 Hasil Inversi model tiga lapis (konduktif di antara resistif) dengan AG .....	60
Gambar 4.7 Hasil Inversi model tiga lapis (konduktif di antara resistif) dengan AG .....	61
Gambar 4.8 <i>Error</i> sebagai fungsi Generasi pada hasil inversi model bumi tiga lapis (konduktif di antara resistif).....	62
Gambar 4.9 Hasil Inversi model tiga lapis (resistif di antara konduktif) dengan AG .....	63

- Gambar 4.10 *Error* sebagai fungsi Generasi pada hasil inversi model bumi tiga lapis (resistif di antara konduktif) 63
- Gambar 4.11 Hasil Inversi model bumi lima lapis (resistif, konduktif, resistif, konduktif, resistif) dengan AG 64
- Gambar 4.12 *Error* sebagai fungsi Generasi pada hasil inversi model bumi lima lapis ..... 65
- Gambar 4.13 Solusi non-dominasi untuk permasalahan *Test Function* NSGA-II..... 69
- Gambar 4.14 Hasil inversi model tiga lapis (konduktif di antara resistif) dengan NSGA-II ..... 71
- Gambar 4.15 Solusi non-dominasi model bumi tiga lapis, konduktif antara resistif, dengan NSGA-II ..... 72
- Gambar 4.16 Hasil inversi model tiga lapis (resistiv di antara konduktiv) dengan NSGA-II ..... 73
- Gambar 4.17 Solusi non-dominasi model bumi tiga lapis, resistiv antara konduktif, dengan NSGA-II ..... 74
- Gambar 4.18 Hasil inversi model bumi lima lapis NSGA-II .... 74
- Gambar 4.19 Solusi non-dominasi model bumi lima lapis dengan NSGA-II ..... 75
- Gambar 4.20 Respon model data lapangan ..... 78
- Gambar 4.21 Hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II..... 80

Gambar 4.22 Solusi non-dominasi data lapangan NSGA-II .....81

Gambar 4.23 Hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II .....81

## **DAFTAR LAMPIRAN**

<b>LAMPIRAN 1</b>	Tabel Perhitungan Waktu Inversi Untuk Algoritma Genetik dan NSGA-II.....	89
<b>LAMPIRAN 2</b>	Data Lapangan Magnetotelurik .....	109

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1. 1 Latar Belakang**

Geofisika merupakan studi mengenai kejadian-kejadian fisis yang terjadi di bumi berdasarkan prinsip-prinsip fisika di antaranya penjalaran gelombang, sifat kelistrikan dan kemagnetan medium, gravitasi bumi, dan elektromagnetik. Menurut Kearey et al (2002), investigasi geofisika merupakan suatu pengukuran dekat permukaan bumi yang dipengaruhi oleh distribusi sifat-sifat fisika di bawahnya. Dengan mempelajari sifat-sifat fisika, dapat diketahui kondisi bawah permukaan bumi. Investigasi geofisika terbagi menjadi dua, yaitu investigasi geofisika aktif dan pasif.

Investigasi geofisika aktif memerlukan suatu sumber yang diberikan agar bumi memberikan responnya sedangkan investigasi geofisika pasif tidak memerlukan sumber agar bumi memberikan responnya. Studi geofisika pasif memiliki keuntungan yang lebih dibandingkan dengan studi geofisika aktif dari segi efisiensi maupun kedalaman investigasi untuk mempelajari struktur bumi.

Metode Magnetotelurik (MT) memanfaatkan medan elektromagnetik alami bumi yang disebabkan kejadian di luar bumi yaitu fenomena meteorologi dan matahari sebagai target utama untuk dipelajari. Metode ini mengestimasi sifat kelistrikan (konduktivitas atau resistivitas) dari masing-masing lapisan dengan mengukur secara simultan medan listrik ( $E$ ) dan magnet ( $H$ ) alami bumi yang akan menggambarkan anomali sifat kelistrikan pada suatu lapisan tertentu (Grandis, 2009). Metode ini banyak digunakan dalam eksplorasi mineral, hidrokarbon, panas bumi, dan mengenai geodinamika (Chave and Jones, 2012).

Pemodelan MT merupakan suatu hal yang menarik untuk dipelajari berdasarkan sifat-sifat fisika yang mendasarinya. Dalam pemodelan MT, model sederhana yang merepresentasikan kondisi bawah permukaan bumi adalah model satu dimensi. Menurut Simpson and Bahr (2005), dalam model satu dimensi bumi

digambarkan sebagai medium homogen berlapis *half space* dengan resistivitas yang bervariasi terhadap masing-masing ketebalan lapisan. Diskontinuitas sifat kelistrikan hanya terjadi pada batas antara bumi dan udara. Respon model didapatkan dengan memecahkan Persamaan Maxwell untuk medium satu dimensi homogen berlapis *half space* dan dinyatakan sebagai resistivitas semu dan fasa sebagai fungsi periode atau frekuensi.

Dalam mempelajari MT satu dimensi, diperlukan parameter model, resistivitas dan ketebalan lapisan, untuk pemodelan kedepan (*forward modelling*) untuk mendapatkan respon model yang mungkin akan ditemui di lapangan. Namun, menurut Grandis (2009), pemodelan kedepan merupakan proses coba-coba (*trial and error*) yang membutuhkan cukup pengalaman agar bisa menentukan parameter model yang cocok sehingga model yang didapatkan sesuai dengan kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, agar lebih memudahkan, digunakan pemodelan kebelakang (*invers modelling*) untuk mendapatkan respon model hasil pengamatan dan perhitungan dengan kecocokkan (*fitness*) yang tinggi. Inversi MT satu dimensi memiliki hubungan parameter model dan respon model yang tidak linear. Diperlukan metode optimasi untuk menyelesaikan masalah inversi non-linear tersebut.

Optimasi merupakan metode yang diterapkan dalam suatu permasalahan untuk mendapatkan solusi optimum. Menurut Deb (2001), optimasi bertujuan untuk menentukan satu atau lebih solusi yang mungkin yang sesuai dengan nilai ekstrim satu atau lebih objektif. Biasanya, permasalahan optimasi ini muncul untuk meminimumkan harga yang berhubungan dengan hasil optimal yang didapatkan. Dalam geofisika sendiri, masalah optimasi erat kaitannya dengan inversi untuk mendapatkan respon model hasil perhitungan yang memiliki kesesuaian (*fitness*) yang tinggi dengan respon model hasil pengukuran.

Menurut Haupt and Haupt (2004), metode optimasi merupakan proses penyesuaian input terhadap proses matematika ataupun suatu eksperimen untuk mendapatkan hasil yang

maksimum maupun minimum sesuai permasalahan yang dihadapi. Masukannya berupa suatu variable yang akan diproses oleh suatu fungsi yang dikenal sebagai fungsi objektif (*objective function*). Ada beberapa algoritma yang dapat digunakan untuk permasalahan optimasi, salah satu yang digunakan dalam penelitian ini adalah Algoritma Genetik pengkodean real (*Genetic Algorithm Real Code*) dan algoritma untuk meminimumkan beberapa fungsi objektif yang berbasis AG yaitu *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (Deb et al, 2002).

Dalam inversi Magnetotelurik satu dimensi, AG kode real digunakan untuk menentukan parameter model (resistivitas dan ketebalan lapisan) dengan cara meminimumkan fungsi objektif tunggal (*single objective*) yang merupakan fungsi gabungan antara logaritmik resistivitas semu dan selisih fasa antara data perhitungan dan observasi (Grandis, 2009). Fungsi gabungan ini perlu ditambah fungsi pembobot, yang besarnya tergantung pada besarnya amplitudo resistivitas semu dan fasa. Artinya, setiap data akan memiliki fungsi pembobot yang berbeda-beda. Pencarian nilai pembobot yang cocok untuk suatu data ini, tidaklah mudah dan perlu coba-coba.

Proses inversi objektif jamak menggunakan objektif tunggal akan memunculkan beberapa permasalahan. Menurut Srinivas and Deb (1995), permasalahan objektif jamak yang diselesaikan dengan cara membuatnya menjadi objektif tunggal, solusinya sangat sensitif terhadap fungsi pembobot yang ditambahkan. Permasalahan lainnya seperti yang dinyatakan oleh Dal Moro (2010) yaitu meningkatkan jumlah minimum lokal dan hasil akhir yang didapatkan bukan merupakan hasil yang optimum karena berhadapan dengan ketidak-unican yang tinggi.

Kemudian dikembangkan algoritma untuk permasalahan optimasi objektif jamak (*multi-objective*), salah satunya yaitu *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (Deb et al, 2002). Konsep dasar NSGA-II mirip dengan GA, yang membedakannya hanya dalam proses seleksi berdasarkan *non-dominated sorting* dan *crowding distance*. Dalam inversi

Magnetotelurik satu dimensi, NSGA II digunakan untuk menentukan parameter model (resistivitas dan ketebalan masing-masing lapisan) dengan meminimumkan dua fungsi objektif secara bersamaan yaitu selisih logaritmik resistivitas semu dan selisih antara data perhitungan dan observasi. Pada penelitian ini, akan dilakukan proses inversi data MT menggunakan AG untuk objektif tunggal dan jamak. Kedua metode ini diterapkan pada data sintetik dan data lapangan. Selanjutnya, kedua hasil algoritma ini dianalisis dan diinterpretasikan secara seksama.

## **1.2 Rumusan Permasalahan**

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kemampuan Algoritma Genetik dalam menyelesaikan permasalahan objektif tunggal dan jamak pada data sintetik?
2. Bagaimana hasil inversi pada data pengamatan sesungguhnya menggunakan Algoritma Genetik ?
3. Bagaimana waktu yang dibutuhkan Algoritma Genetik dalam melakukan inversi Magnetotelurik satu dimensi permasalahan objektif tunggal dan jamak pada data sintetik?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan perumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kemampuan Algoritma Genetik dalam menyelesaikan permasalahan objektif tunggal dan jamak pada data sintetik.
2. Mengetahui hasil inversi pada data pengamatan sesungguhnya menggunakan Algoritma Genetik
3. Membandingkan waktu yang dibutuhkan Algoritma Genetik dalam melakukan inversi Magnetotelurik satu dimensi permasalahan objektif tunggal dan jamak pada data sintetik.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Model bumi yang digunakan sebagai studi Magnetotelurik adalah model bumi satu dimensi homogen isotropik *half space*.
2. Asumsi-asumsi dasar mengenai studi Magnetotelurik harus dipatuhi.
3. Hanya digunakan metode inversi Algoritma Genetik dalam penyelesaian masalah inversi Magnetotelurik satu dimensi objektif tunggal dan jamak.
4. Data sintetik yang dibuat merupakan data sederhana yang berfungsi untuk menunjukkan respon antara *forward modelling* dan *inverse modelling*.
5. Data sesungguhnya yang digunakan berfungsi untuk menunjukkan bagaimana Algoritma Genetik digunakan untuk inversi data sesungguhnya.

#### **1.5 Manfaat penelitian**

Manfaat penelitian yang dijadikan tugas akhir ini adalah:

1. Penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk melakukan penelitian sejenis maupun penelitian yang lebih lanjut lagi.
2. Penelitian ini menunjukkan kemampuan dari Algoritma Genetik dalam menyelesaikan permasalahan inversi non-linear untuk objektif tunggal dan jamak
3. Penelitian ini dapat dijadikan jurnal ilmiah dalam bidang geofisika.

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah:

1. BAB I Pendahuluan, berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan

2. BAB II Tinjauan Pustaka, berisi teori-teori dasar mengenai Magnetotelurik yang merupakan tema dalam tugas akhir ini.
3. BAB III Metodologi Penelitian, berisi langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini.
4. BAB IV Analisa Data dan Pembahasan, berisi data-data yang digunakan dalam penelitian, hasil pengolahan data, serta pembahasan mengenai hasil pengolahan data.
5. BAB V Kesimpulan dan Saran, berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian serta berisi saran-saran mengenai penelitian yang telah dilakukan maupun pengembangan dari penelitian ini lebih lanjut.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pengenalan Magnetotelurik

Magnetotelurik (MT) merupakan metode eksplorasi geofisika yang pasif karena untuk mendapatkan respon dari bumi, tidak diberikan respon terlebih dahulu ke bumi. Magnetotelurik memanfaatkan spektrum yang luas dari variasi magnetik bumi yang terjadi secara alami akibat aktivitas-aktivitas di luar bumi sebagai sumber energi induksi elektromagnetik di bumi. Magnetotelurik mengukur fluktuasi medan listrik ( $E$ ) dan medan magnet ( $B$ ) alami secara simultan sebagai fungsi waktu dengan arah yang ortogonal terhadap permukaan bumi. Arah ortogonal terhadap permukaan bumi berarti penentuan struktur konduktivitas bumi dapat dilakukan pada range kedalaman beberapa ratus sampai beberapa ribu kilometer (Simpson and Bahr, 2005). Dalam pengukuran tersebut, dapat ditentukan sifat kelistrikan (konduktivitas atau resistivitas) dari permukaan lapisan bumi yang didapatkan dari hubungan variasi medan listrik ( $E$ ) dan medan magnet ( $B$ ) (Naidu, 2012).

Konsep mengenai metode Magnetotelurik pertama kali diperkenalkan oleh Tikhnov (1950) yang selanjutnya dijelaskan lebih detail oleh Cagniard (1953). Inti dari kajian keduanya adalah respon elektromagnetik dalam suatu kedalaman dapat diperoleh dengan memperluas periode *sounding* dari Magnetotelurik. Prinsip ini berhubungan dengan *skin depth* dari elektromagnetik yang menjelaskan mengenai difusi dari elektromagnetik (Simpson and Bahr, 2005). Diketahui bahwa difusi elektromagnetik dalam suatu medium memiliki faktor peluruhan eksponensial, sehingga akan mengurangi kemampuan Magnetotelurik dalam mengidentifikasi lapisan-lapisan seiring bertambahnya kedalaman. *Skin depth* elektromagnetik yang berdifusi dapat dinyatakan sebagai

$$p(T) = (T/\pi\mu\sigma)^2 \quad (2.1)$$

dengan  $p(T)$  merupakan *skin depth* dalam periode  $T$ ,  $\bar{\sigma}$  merupakan konduktivitas rata-rata medium, dan  $\mu$  merupakan permeabilitas magnetik. Persamaan (2.1) mengandung faktor peredaman sebesar  $1/e$  dari amplitudo semula di permukaan bumi dengan bertambahnya kedalaman. Karena itu, penggunaan persamaan di atas dianggap kurang efektif karena akan membuat lapisan konduktivitas yang berada pada atau lebih dalam dari  $p(T)$  menjadi tidak teridentifikasi. Oleh karena itu, dalam studi Magnetotelurik, persamaan *skin depth* biasanya didekati oleh Persamaan *penetration depth* yaitu (Simpson and Bahr, 2005)

$$p(T) \approx 500(T\rho_a)^{1/2} \quad (2.2)$$

dengan  $\rho_a$  merupakan resistivitas semu. Range periode yang dapat dipelajari dalam Magnetotelurik yaitu  $10^{-3}$  sampai  $10^5$  s. Sehingga berdasarkan Persamaan (2.1) dan (2.2) di atas, dengan mengasumsikan resistivitas medium adalah  $100 \Omega\text{m}$ , maka didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 160 m sampai lebih dari 500 km untuk melakukan identifikasi konduktivitas lapisan. Hal ini merupakan keuntungan dari metode geofisika pasif berbasis elektromagnetik dibandingkan dengan metode geofisika aktif (Simpson and Bahr, 2005).

## 2.2 Sinyal Magnetotelurik

Magnetotelurik yang merupakan suatu metode eksplorasi elektromagnetik geofisika untuk menggambarkan distribusi sifat kelistrikan (konduktivitas atau resistivitas) di permukaan bumi dengan sumber energi yang berasal dari sumber alami di luar bumi. Ketika energi eksternal ini sampai di bumi, diketahui sebagai medan elektromagnetik primer, maka energi tersebut akan mengalami penetrasi ke dalam bumi sebagai arus induksi (arus *telluric*) dan ada yang dipantulkankembali ke luar bumi. Energi yang mengalami penetrasi ke dalam bumi akan mengganggu medan elektromagnetik alami bumi dan menghasilkan medan

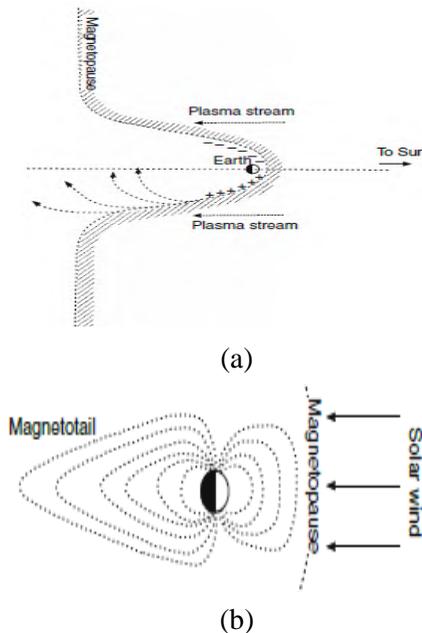
magnetik sekunder. Karena itu, yang diukur dalam Magnetotelurik merupakan variasi medan listrik dan magnet secara simultan sebagai fungsi waktu. Dalam metode eksplorasi Magnetotelurik, sinyal yang dapat digunakan adalah sinyal yang memiliki range periode dari  $10^{-3}$  sampai  $10^5$  s ( $10^{-5}$  sampai  $10^3$  Hz). Sinyal Magnetotelurik yang diinduksi ke bumi terbagi menjadi dua, yaitu sinyal dalam frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Sinyal yang memiliki frekuensi rendah dihasilkan dari interaksi *solar wind* dengan magnetosfer bumi dan berinteraksi dengan bumi. Sedangkan frekuensi tinggi dihasilkan dari aktivitasi badai petir yang terjadi di *ionosphere* bumi dan berinteraksi dengan bumi (Naidu, 2012).

### 2.2.1 Sinyal Magnetotelurik Frekuensi Rendah (<1 Hz)

Interaksi antara *solar wind* dan *magnetosphere* akan menghasilkan fluktuasi elektromagnetik dengan frekuensi kurang dari 1Hz (Parker, 1958) (Gambar 2.1). *Solar wind* merupakan suatu aliran kontinu dari plasma yang membawa proton dan elektron yang berasal dari matahari yang akan meradiasi bumi. Ketika *solar wind* bertemu medan magnetik bumi di *magnetopause*, maka akan terjadi interaksi berupa pemisahan proton dan elektron. Kemudian adanya muatan positif dan negatif ini akan menghasilkan medan listrik. Interaksi medan listrik dan medan magnet pada magnetosfer akan menghasilkan medan elektromagnetik berfrekuensi rendah (< 1 Hz).

Terdapat variasi dalam densitas, kecepatan, dan intensitas medan magnet yang berasal dari *solar wind*, yang dapat menyebabkan variasi distorsi secara cepat pada *magnetosphere* bumi (Gambar 2.1). Variasi distorsi secara cepat pada *magnetosphere* akan menghasilkan variasi sinusoidal yang kecil dari geomagnetik yang disebut sebagai pulsa geomagnetik. Interaksi induktif dan magnetodinamik antara *magnetosphere* dengan *ionosphere* secara kompleks akan menghasilkan fluktuasi medan sebelum mencapai bumi (Simpson and Bahr, 2005). Fluktuasi medan listrik tersebut akan menghasilkan energi

elektromagnetik dengan frekuensi rendah yang akan melakukan interaksi di bumi, yang selanjutnya dapat menghasilkan medan listrik dan medan magnet sekunder. Kedua medan sekunder ini digunakan dalam eksplorasi magnetotelik (Naidu, 2012).

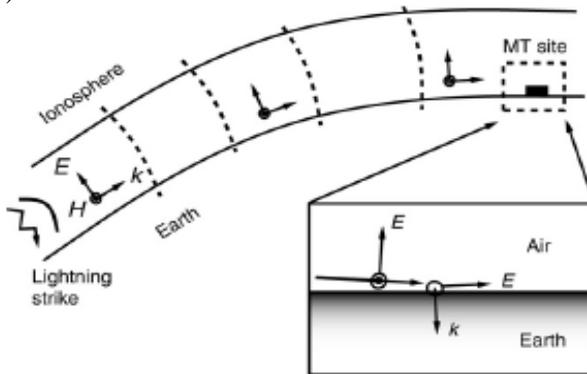


Gambar 2.1 (a) Distorsi plasma *solar wind* oleh medan magnetik bumi (b) Garis medan magnet bumi yang menunjukkan *Magnetosphere* (Simpson and Bahr, 2005)

### 2.2.2 Sinyal Magnetotelik Frekuensi Tinggi (>1 Hz)

Medan elektromagnetik dengan frekuensi yang lebih tinggi dari 1 Hz diakibatkan oleh aktivitas meteorologi seperti badai petir di *ionosphere* (Gambar 2.2). Badai petir yang terjadi di *ionosphere* akan membawa sinyal dengan frekuensi

elektromagnetik besar ( $> 1$  Hz) yang dikenal sebagai *sferics*. *Sferics* yang sampai di bumi ada yang masuk kedalam bumi sebagai arus telluric dan ada yang menyebar ke seluruh bumi dalam bentuk pandu gelombang yang dibatasi oleh *ionosphere* dan permukaan bumi. Penyebaran *sferics* dalam bentuk pandu gelombang sebagai gelombang *Transverse Electric (TE)*, *Transverse Magnetik(TM)*, ataupun *Transverse Electric-Magnetik (TEM)*.



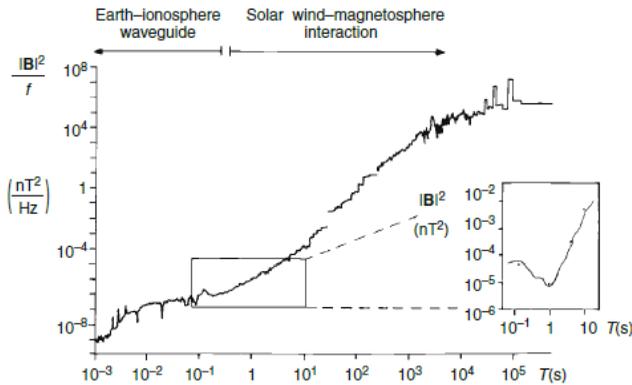
Gambar 2.2 Penyebaran gelombang elektromagnetik di tempat pengukuran Magnetotelurik (Unsworth, 2007)

Puncak dari *sferics* terjadi pada siang hari (Simpson and Bahr, 2005). Ketika *sferics* berinteraksi dengan bumi, maka medan magnet bumi terus mengalami ketidakstabilan (fluktuasi) dan akan menghasilkan arus listrik di bawah permukaan bumi. Fluktuasi medan listrik ini akan menimbulkan medan magnet sekunder.

### 2.2.3 Noise Sinyal Magnetotelurik

Sinyal *Magnetotelurik* yang berasal dari aktivitas meteorologi ( $> 1$ Hz) maupun yang terjadi akibat *solar wind* ( $< 1$ Hz) merupakan suatu sumber yang digunakan untuk eksplorasi Magnetotelurik (Gambar 2.3). Sumber-sumber tersebut akan mempengaruhi medan magnet bumi dan akan menghasilkan medan listrik dan medan magnet sekunder di luar inti yang bersifat

lebih transien dan fluktuasi amplitudo yang lebih rendah. Namun, terdapat fluktuasi menurun dari spektrum energi dalam range frekuensi 0.5 – 5 Hz dengan nilai minimum terjadi pada frekuensi 1 Hz. Fluktuasi ini akan berimbas pada pengukuran Magnetotelurik yang menyebabkan berkurangnya kualitas data. Fluktuasi ini disebut sebagai *dead-band* dari sinyal dengan amplitudo rendah yang merupakan akibat dari mekanisme induksi sumbar sinyal Magnetotelurik (Simpson and Bahr, 2005).



Gambar 2.3 Spektrum energi sinyal Magnetotelurik (Simpson and Bahr, 2005)

### 2.3 Asumsi Dasar Magnetotelurik

Dalam mempelajari Magnetotelurik, terdapat asumsi-asumsi dasar yang dapat dijadikan pedoman. Berikut asumsi dasar ini dibuat berdasarkan induksi elektromagnetik ke dalam bumi (Simpson and Bahr, 2005)

- Digunakan persamaan umum elektromagnetik Maxwell.
- Bumi tidak menghasilkan energi elektromagnetik sendiri, namun hanya menyerap dan menyebarkan.

- Semua medan yang berada di dalam bumi dianggap sebagai medan konservatif dan dapat diamati jauh dari sumbernya atau diamati di permukaan bumi.
- Sumber medan elektromagnetik yang digunakan dalam penelitian merupakan medan elektromagnetik alami yang dihasilkan dari proses meteorology maupun dari *solar wind*. Sumber medan elektromagnetik alami ini dianggap bersifat seragam (*uniform*) dan diinduksi ke dalam bumi dalam bentuk gelombang bidang yang terpolarisasi pada kejadian vertikal.
- Tidak terdapat akumulasi muatan bebas pada setiap lapisan bumi.
- Bumi dianggap sebagai medium konduktiv yang mampu untuk menghantarkan arus listrik berdasarkan persamaan

$$j = \sigma E \quad (2.3)$$

dengan  $j$  merupakan rapat arus ( $\text{Am}^{-2}$ ),  $\sigma$  merupakan konduktivitas medium bumi ( $\text{Sm}^{-1}$ ) dan  $E$  adalah medan listrik ( $\text{Vm}^{-1}$ ).

- Perpindahan listrik tidak bervariasi terhadap waktu atau kuasi-statik, sehingga perbandingan antara variasi waktu arus perpindahan terhadap variasi waktu arus konduksi dapat diabaikan. Karena itu, dapat dianggap bahwa medan elektromagnetik bumi berasal dari proses difusi.
- Variasi permitivitas dan permeabilitas batuan diasumsikan tidak ada atau dianggap sama untuk semua batuan.

## 2.4 Persamaan Maxwell

Terdapat empat Persamaan Maxwell yang mampu menjelaskan mengenai hubungan antara medan listrik dan medan magnet dalam suatu medium (Griffiths, 1999)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.4)$$

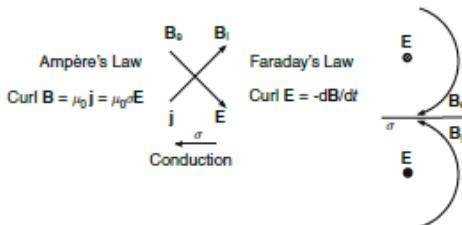
$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.7)$$

dengan  $E$  adalah medan listrik (V/m),  $B$  adalah induksi magnetik ( $\text{W/m}^2$  atau Tesla),  $H$  adalah medan magnet (A/m),  $j$  adalah rapat arus ( $\text{A/m}^2$ ),  $D$  adalah perpindahan listrik ( $\text{C/m}^2$ ), dan  $\rho$  adalah rapat muatan listrik ( $\text{C/m}^3$ ).

Persamaan (2.4) merupakan Hukum Faraday yang menyatakan bahwa medan listrik timbul akibat variasi medan magnet terhadap waktu dengan gerak listrik yang berlawanan dengan fluks penyebabnya. Hukum Faraday ini dapat dilihat ketika sumber sinyal Magnetotelurik yang berasal dari *solar* wind dan aktivitas meteorologi menyebabkan fluktuasi terhadap medan magnet bumi. Fluktuasi medan magnet ini dapat menyebabkan timbulnya medan listrik sekunder di dalam bumi. Persamaan (2.5) merupakan hukum Ampere yang menyatakan kebalikan dari Persamaan (2.4), yaitu medan magnet ditimbulkan oleh fluks total arus listrik yang meliputi rapat arus konduktiv dan perpindahan arus. Hukum Ampere dapat dilihat ketika fluktuasi medan listrik sekunder di bawah permukaan bumi akan menimbulkan medan magnet sekunder. Kedua pernyataan di atas dapat dinyatakan seperti Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Hubungan hukum Faraday dan hukum Ampere (Simpson and Bahr, 2005)

Persamaan (2.6) merupakan Persamaan Gauss yang menyatakan bahwa banyaknya arus yang berpindah dari suatu ruang sebanding jumlah muatan yang terdapat dalam ruang tersebut. Persamaan (2.7) merupakan hukum Gauss untuk magnetism yang menyatakan bahwa tidak terdapat monopul magnet dalam suatu medium, melainkan dwipol magnet (Griffiths, 1999).

Persamaan Maxwell dapat dihubungkan melalui hubungan konstitutiv sebagaimana berikut,

$$D = \varepsilon E \quad (2.8)$$

$$J = \sigma E \quad (2.9)$$

$$B = \mu H \quad (2.10)$$

dengan variabel  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$  merupakan sifat intrinsik dari medium tempat medan elektromagnetik menyebar.  $\varepsilon$  (F/m) merupakan permitivitas listrik,  $\sigma$  (S/m) merupakan konduktivitas listrik, dan  $\mu$  (H/m) merupakan permeabilitas magnetik. Dalam Magnetotelurik satu dimensi, variable-variabel tersebut merupakan besaran skalar. Namun, dalam Magnetotelurik dua dan tiga dimensi, variable-variabel tersebut harus dinyatakan dalam tensor (Naidu, 2012).

Dalam studi Magnetotelurik satu dimensi, medium dianggap sebagai medium homogen isotropi yang berarti sifat fisika seperti resistivitas medium tidak bervariasi terhadap waktu dan posisi. Dalam segi posisi, resistivitas suatu batuan memiliki nilai yang sama dalam satu lapisan yang sama dan hanya bervariasi dengan batuan lain pada lapisan lain. Nilai resistivitas juga tidak bervariasi terhadap waktu, sehingga nilainya akan sama dari waktu ke waktu. Karena medium dianggap sebagai medium yang homogen isotropik, maka tidak terjadi akumulasi muatan pada suatu lapisan sehingga Persamaan Maxwell (2.6) bernilai nol. Dengan substitusi Persamaan (2.8) sampai (2.10) ke Persamaan Maxwell (2.4) sampai (2.7), maka Persamaan Maxwell di atas menjadi,

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (2.14)$$

Persamaan (2.11) sampai (2.14) menyatakan bahwa arah dari medan listrik dan medan magnet akan tegak lurus. Hal ini dapat dilihat dari divergensi  $E$  dan  $H$  bernilai nol. Hal ini pula seperti yang telah dijabarkan di Subbab 2.3 mengenai konsep dasar Magnetotelurik yaitu sumber medan elektromagnetik yang berasal dari luar bumi diinduksi ke dalam bumi dalam bentuk gelombang bidang. Apabila dioperasikan operator *curl* pada Persamaan (2.11) dan (2.12), maka menjadi,

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

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

Persamaan (2.15) dan (2.16) mengandung variable  $E$  dan  $H$  yang merupakan variabel dengan fungsi posisi dan waktu. Variabel  $E$  dan  $H$  dapat dinyatakan sebagai kombinasi dari gelombang harmonik yaitu

$$E = E_0 e^{i(\omega t + kr)} \quad (2.17)$$

$$H = H_0 e^{i(\omega t + kr)} \quad (2.18)$$

dengan  $\omega$  (rad/s) merupakan frekuensi sudut dari osilasi elektromagnetik,  $t$  (s) merupakan waktu,  $k$  ( $\text{m}^{-1}$ ) dan  $r$  (m) merupakan vektor gelombang dan posisi. Dalam bentuk eksponensial pada persamaan di atas, bentuk pertama eksponensial menyatakan osilasi dari gelombang dan bentuk kedua eksponensial

menyatakan propagasi gelombang.  $E_0$  dan  $H_0$  merupakan amplitudo medan listrik dan medan magnet (Naidu, 2012).

Dengan substitusi Persamaan (2.17) dan (2.18) ke Persamaan (2.15) dan (2.16), maka persamaannya menjadi

$$\nabla^2 E = (i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)E \quad (2.19)$$

$$\nabla^2 H = (i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)H \quad (2.20)$$

Seperti yang telah dijelaskan pada asumsi dasar Magnetotelurik, bumi dianggap sebagai medium konduktiv yang mampu untuk menghantarkan arus listrik sehingga nilai konduktivitas bumi sangat besar. Pada Persamaan (2.19) dan (2.20), nilai konduktivitas ( $\sigma$ ) nilainya jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai permitivitas listrik ( $\varepsilon$ ) dari bumi sehingga permitivitas listrik dapat diabaikan.

$$\omega\mu\sigma \gg \omega^2\mu\varepsilon \quad (2.21)$$

Selain dari konsep bumi sebagai medium konduktor, konsep lainnya yang dapat mendukung permitivitas listrik ( $\varepsilon$ ) adalah pendekatan kuasi-statik. Dalam pendekatan ini, perpindahan arus yang berasal dari bumi sendiri dapat diabaikan terhadap arus konduksi yang dihasilkan dari interaksi bumi dengan *solar wind* maupun badai petir untuk range periode  $10^{-5}$  sampai  $10^5$ . Oleh karena itu, medan elektromagnetik yang menyebar lewat bumi dapat dianggap sebagai proses difusi sehingga memungkinkan untuk mendapatkan respon dari rerata volumetrik lapisan konduktiv dalam bumi (Naidu, 2012).

$$\frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (2.22)$$

Persamaan (2.5) menjadi

$$\nabla \times H = j \quad (2.23)$$

Persamaan (2.19) dan (2.20) menjadi

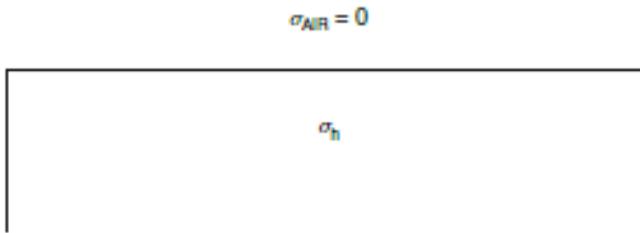
$$\nabla^2 E = (i\omega\mu\sigma)E = k^2 E \quad (2.24)$$

$$\nabla^2 H = (i\omega\mu\sigma)H = k^2 H \quad (2.25)$$

Persamaan (2.24) dan (2.25) di atas merupakan Persamaan difusi gelombang.

## 2.5 Penetrasi Medan Elektromagnetik

Dalam mempelajari Magnetotellurik, konsep yang paling sederhana yang dapat diterapkan pada bumi adalah medium *half space* homogen isotropik (Gambar 2.5). Medium ini terdiri dari



Gambar 2.5 Medium *half space* homogen isotropic (Simpson and Bahr, 2005)

lapisan udara dengan nilai konduktivitas listrik nol yang terletak di atas lapisan yang konduktif. Sehingga diskontinuitas dari konduktivitas hanya dibatasi oleh udara dan lapisan konduktif (Simpson and Bahr, 2005). Medan elektromagnetik yang hanya bergerak ke arah sumbu  $z$  saja menyebabkan komponen medan listrik dan medan magnet hanya bervariasi terhadap kedalaman, sehingga variasi medan listrik dan medan magnet dalam arah horizontal sama dengan nol.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0 \quad (2.26)$$

Dengan penjaralan medan elektromagnetik ke arah sumbu z, maka komponen medan listrik dan medan magnet kearah sumbu z sama dengan nol.

$$E_z = H_z = 0 \quad (2.27)$$

dengan menggunakan Persamaan difusi gelombang (2.24)

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

maka didapatkan bilangan gelombang,

$$k = \sqrt{i\omega\mu\sigma} = \sqrt{\omega\mu_0\sigma/2} + i\sqrt{\omega\mu_0\sigma/2} \quad (2.29)$$

sehingga invers dari bagian real k

$$\delta = 1/\text{Re}(k) = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma} \quad (2.30)$$

dengan  $\delta$  merupakan kedalaman penetrasi dari medan listrik ke dalam medium yang *half space* homogen isotropik.

## 2.6 Bumi Sebagai Medium *Uniform Half Space*

Dalam kasus bumi sebagai medium *uniform half space*, bumi diperlakukan sebagai suatu medium yang konduktiv dengan permukaan yang datar di mana diskontinuitas tahanan jenis hanya terjadi pada batas antara udara dengan lapisan konduktiv (Naidu, 2012). Persamaan (2.24) memiliki solusi elementer sebagai berikut

$$E_x = Ae^{kz} + Be^{-kz} \quad (2.31)$$

dengan  $z$  adalah kedalaman di mana bernilai positif untuk arah vertikal ke bawah. Pada Persamaan (2.31) bilangan imajiner dari eksponensial menyatakan variasi sinusoidal gelombang elektromagnetik terhadap kedalaman. Sedangkan bilangan real pada persamaan di atas menyatakan faktor peredaman (*attenuation*) terhadap kedalaman.

Dengan kombinasi Persamaan (2.11), Persamaan (2.18), dan Persamaan (2.31) maka didapatkan,

$$H_y = \frac{k}{i\omega\mu_0} (Ae^{kz} - Be^{-kz}) \quad (2.32)$$

Persamaan (2.31) dan (2.32) menyatakan bahwa gelombang yang menyebar ke dalam bumi (linear, homogen, dan isotropik) memiliki arah medan listrik dan medan magnet saling ortogonal. Ketiga gelombang elektromagnetik yang menjalar ke arah sumbu  $z$ , maka komponen gelombang elektromagnetik (medan listrik dan medan magnet) akan saling tegak lurus dengan arah penyebarannya. Hal ini disebabkan karena gelombang elektromagnetik sebagai gelombang bidang (Naidu, 2012).

### 2.6.1 Syarat Batas

Dalam studi Magnetotelurik, bumi tidak dianggap menghasilkan medan elektromagnetik sendiri. Medan elektromagnetik yang dipancarkan bumi berasal dari sumber-sumber yang menghasilkan medan elektromagnetik dari luar bumi (*solar wind* dan *thunderstorm*) yang diinduksikan ke dalam bumi. Karena itu, terdapat suatu keadaan syarat batas mengenai medan elektromagnetik yang diinduksi ke dalam bumi. Syarat batas tersebut memiliki ketentuan bahwa,

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow \infty} E(z) &= 0 \\ \lim_{z \rightarrow \infty} H(z) &= 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

yang berhubungan dengan kondisi fisika bahwa terdapat sejumlah energi yang tersimpan di dalam bumi pada suatu kedalaman tertentu. Karena medan elektromagnetik bumi berasal dari luar bumi, maka gelombang elektromagnetik hasil induksi tersebut akan melapisi gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh bumi sendiri yang letaknya lebih dalam bahkan mendekati inti bumi dibandingkan gelombang elektromagnetik induksi. Oleh karena itu, pada kedalaman tak hingga, gelombang elektromagnetik hasil induksi lama kelamaan akan berkurang sampai menjadi nol. Secara fisis berkurangnya medan elektromagnetik induksi disebabkan karena makin mendekati inti bumi maka lapisan akan berkurang kepadatannya, sehingga resistivitas lapisannya akan semakin kecil (Simpson and Bahr, 2005).

Gelombang akan semakin cepat dan semakin jauh merambat dalam medium yang lebih rapat karena partikel-partikel medium akan lebih mudah melewati gelombang ketika melewatinya. Ketika gelombang elektromagnetik melewati suatu lapisan yang terdapat patahan (*fault*) maupun retakan (*fracture*), maka akan mempengaruhi kecepatan dan penetrasi gelombang elektromagnetik tersebut.

Pada Persamaan (2.31) dan (2.32), koefisien  $B$  bernilai nol. Hal ini karena gelombang elektromagnetik pada kedalaman tak hingga harus berharga nol. Ini mungkin terjadi pada eksponensial yang berada pada koefisien  $A$ . Koefisien  $A$  sendiri mengandung faktor *attenuation* yang ada di eksponensialnya. Persamaan tersebut dapat dituliskan kembali dalam bentuk

$$E_x = Ae^{kz} \quad (2.34)$$

$$H_y = \frac{k}{i\omega\mu_0} (Ae^{kz}) \quad (2.35)$$

### 2.6.2 Impedansi Bumi *Uniform Half Space*

Gelombang elektromagnetik menyebar ke dalam bumi dengan komponen medan listrik dan medan magnet yang saling

tegak lurus. Rasio dari intensitas medan listrik dan medan magnet membentuk impedansi ( $Z$ ). Impedansi ( $Z$ ) merupakan suatu karakteristik yang diukur dalam pengukuran Magnetotelurik, menggambarkan sifat sub permukaan medium (Unsworth, 2007),

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{i\omega\mu_0\rho} \quad (2.36)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = -\sqrt{i\omega\mu_0\rho} \quad (2.37)$$

pada persamaan di atas, dapat dilihat bahwa dalam medium yang homogen isotropik, terjadi keterlambatan medan magnet terhadap medan listrik sebesar  $45^\circ$ . Impedansi bumi *uniform half space* dapat dinyatakan dalam bentuk tensor yang berhubungan dengan komponen horizontal dari medan listrik dan medan magnet.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Menjadi suatu tensor, impedansi ( $Z$ ) juga memiliki informasi mengenai dimensi dan arah. Dengan model bumi satu dimensi, dengan konduktivitas hanya bervariasi terhadap kedalaman, diagonal elemen dari tensor impedansi  $Z_{xx}$  dan  $Z_{yy}$  berharga nol. Sedangkan elemen lainnya menyatakan besar dari impedansi tersebut namun memiliki tanda yang berbeda. Sehingga kondisi yang dibutuhkan untuk studi Magnetotelurik 1 dimensi adalah (Berdichevskii and Dmitriev, 2008),

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \text{ dan } Z_{xy} = -Z_{yx} \quad (2.39)$$

impedansi  $Z_{xx}$  dan  $Z_{yy}$  bernilai nol mengingat antara medan magnet dan medan listrik saling tegak lurus. Sedangkan nilai  $Z_{xy}$  dan  $Z_{yx}$  berlawanan tanda karena medium homogen memiliki simetri radial. Dengan demikian Persamaan (2.38) menjadi

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

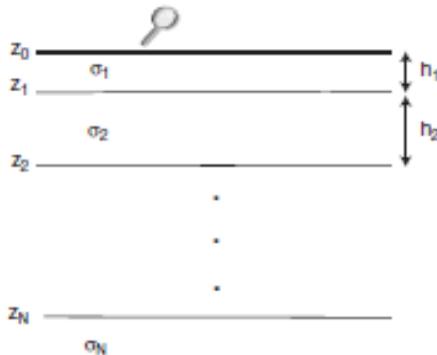
Impedansi pada Persamaan (2.39) maupun (2.40) dapat dinyatakan dalam bentuk tahanan jenis dan fase yaitu (Berdichevskii and Dmitriev, 2008),

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z|^2 \quad (2.41)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z} \right) \quad (2.42)$$

## 2.7 Bumi Sebagai Medium *Layered Half Space*

Bumi sebagai medium *layered half space* (Gambar 2.6) memiliki arti bahwa bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan diskontinuitas konduktivitas hanya pada batas udara dengan bumi yang berlapis. Hal ini berarti variasi konduktivitas terhadap kedalaman sehingga setiap lapisan memiliki nilai konduktivitas yang berbeda (Simpson and Bahr, 2005). Untuk medium bumi berlapis *half space* homogen isotropik, perhitungan impedansi menggunakan Persamaan rekursif. Persamaan rekursif



Gambar 2.6 Medium berlapis *half space* homogen isotropic (Chave and Jones, 2012)

menghubungkan impedansi dari dua permukaan lapisan untuk mengetahui impedansi pada suatu lapisan di antara dua permukaan lapisan tersebut. Perhitungan impedansi dimulai dari lapisan terakhir dengan menganggap lapisan terakhir memiliki nilai impedansi yang sama dengan impedansi interinsiknya. Kemudian dapat ditentukan impedansi lapisan di atas lapisan terakhir dan terus hingga didapatkan nilai impedansi lapisan pertama. Persamaan rekursif dibangun dari Persamaan (2.34) dan (2.35), impedansi pada kedalaman  $z_1$  dalam lapisan ke- $j$  yaitu (Grandis, 2009),

$$Z_j(z_1) = \frac{E_x}{H_y} = Z_{I,j} \frac{e^{-2k_j z_1} + B_j/A_j}{e^{-2k_j z_1} - B_j/A_j} \quad (2.43)$$

dengan  $Z_{I,j}$  merupakan impedansi interinsik pada lapisan ke- $j$ . Impedansi interinsik merupakan impedansi yang dimiliki batuan tersebut yang dinyatakan pada Persamaan (2.36). Persamaan (2.43) masih mengandung variable  $B_j/A_j$  yang merupakan perbandingan amplitudo gelombang yang harus dieliminasi agar persamaan tersebut dapat disederhanakan. Untuk mengeliminasinya, maka didefinisikan impedansi pada kedalaman  $z_2$  dalam lapisan ke- $j$  yaitu,

$$Z_j(z_2) = \frac{E_x}{H_y} = Z_{I,j} \frac{e^{-2k_j z_2} + B_j/A_j}{e^{-2k_j z_2} - B_j/A_j} \quad (2.44)$$

maka didapatkan

$$\frac{B_j}{A_j} = \frac{Z_j(z_2) + Z_{I,j}}{Z_j(z_2) - Z_{I,j}} e^{-2k_j z_2} \quad (2.45)$$

subtitusikan Persamaan (2.45) ke Persamaan (2.43).

$$Z_j(z_1) = Z_{l,j} \frac{1 + \frac{Z_j(z_2) - Z_{l,j}}{Z_j(z_2) + Z_{l,j}} e^{-2k_j(z_2 - z_1)}}{1 - \frac{Z_j(z_2) - Z_{l,j}}{Z_j(z_2) + Z_{l,j}} e^{-2k_j(z_2 - z_1)}} \quad (2.46)$$

Jika  $z_1$  dan  $z_2$  secara berturut-turut merupakan kedalaman yang menunjukkan permukaan lapisan ke- $j$  bagian atas dan bawah, maka pengurangannya akan menghasilkan ketebalan lapisan ke- $j$  tersebut. Pada batas lapisan ke- $j$  dan ke- $j+1$ , terdapat kontinuitas medan listrik dan medan magnet. Apabila terdapat kontinuitas medan listrik dan medan magnet pada batas lapisan, maka terdapat kontinuitas pula pada impedansi di batas lapisan tersebut. Sehingga  $Z_j(z_2) = Z_{j+1}(z_2)$ . Persamaan (2.46) dapat dituliskan sebagai (Grandis, 2009),

$$Z_j = Z_{l,j} \frac{1 - R_j e^{-2k_j h_j}}{1 + R_j e^{-2k_j h_j}} \quad (2.47)$$

dengan

$$R_j = \frac{Z_{l,j} - Z_{j+1}}{Z_{l,j} + Z_{j+1}} \quad (2.48)$$

Persamaan (2.47) merupakan Persamaan rekursif yang menyatakan nilai impedansi pada lapisan ke- $j$  dengan melibatkan nilai impedansi dua lapisan yang menjadi lapisan atas ( $z_1$ ) dan lapisan bawah ( $z_2$ ) dari lapisan ke- $j$  tersebut. Impedansi merupakan fungsi dari tahanan jenis dan ketebalan lapisan ke- $(j)$ . Setelah mendapatkan nilai impedansi lapisan ke- $(j)$ , maka dapat di cari nilai impedansi lapisan ke- $(j-1)$  sampai impedansi pada lapisan pertama. Impedansi bumi berlapis homogen isotropik dapat dinyatakan dalam bentuk resistivitas yang ekuivalen dengan resistivitas semu dan fase berdasarkan Persamaan (2.41) dan (2.42).

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_1|^2 \quad (2.49)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im } Z_1}{\text{Re } Z_2} \right) \quad (2.50)$$

Dalam penelitian, kurva Magnetotelurik yang menyatakan resistivitas sebagai fungsi kedalaman dapat dinyatakan sebagai kurva resistivitas semu dan fase terhadap periode sinyal Magnetotelurik (Grandis, 2009).

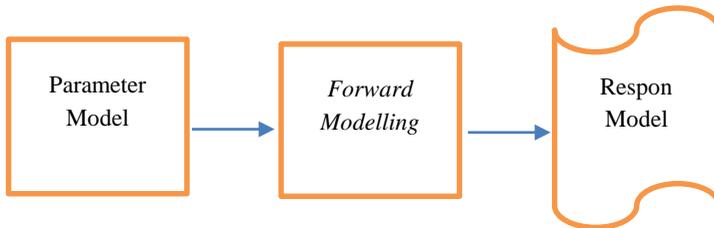
## 2.8 Pemodelan Geofisika

Ilmu Geofisika tidak terlepas dari istilah pemodelan. Pemodelan merupakan suatu cara yang digunakan untuk mengetahui keadaan struktur bawah permukaan yang tidak dapat diamati secara langsung dan untuk mengkarakterisasi kondisi geologi bawah permukaan. Pemodelan dilakukan berdasarkan parameter-parameter model yang diketahui sehingga hasil yang didapatkan dapat merepresentasikan keadaan bawah permukaan yang sebenarnya. Parameter model merupakan suatu sifat fisis yang dimiliki lapisan-lapisan bawah permukaan tanah seperti rapat jenis lapisan, ketebalan lapisan, sifat lapisan terhadap gelombang yang melaluinya, sifat kelistrikan lapisan, sifat kemagnetan lapisan, dan sifat-sifat fisis lainnya. Dalam beberapa refrensi, pemodelan bukan hanya merepresentasikan keadaan geologi bawah permukaan tanah dari suatu model, melainkan hubungan matematika dan teori-teori antara parameter model dan juga respon model (Grandis, 2009).

### 2.8.1 Pemodelan Ke depan

Pemodelan ke depan atau yang dikenal sebagai *forward modelling* merupakan proses memprediksi suatu data pengukuran di mana data pengukuran tersebut akan teramati dari pengukuran di lapangan berdasarkan teori-teori dasar dan kondisi-kondisi spesifik yang relevan terhadap masalah yang sedang diamati

(Menke, 2012). *Forward modelling* dilakukan dengan cara perhitungan matematis menggunakan persamaan-persamaan yang berkaitan dengan masalah yang sedang diamati atau parameter-parameter model bawah permukaan yang ada (Gambar 2.7). Diharapkan pemodelan yang didapatkan merepresentasikan model bawah permukaan yang sebenarnya. Untuk mendapatkan model hasil perhitungan matematis (*respon model*) yang mendekati model sebenarnya, dapat dilakukan dengan proses coba-coba (*trial and error*). Proses coba-coba ini dilakukan dengan cara merubah parameter model yang diketahui. Namun, keberhasilan pemodelan ke depan sangat bergantung kepada pengalaman masing-masing individu yang melakukannya.



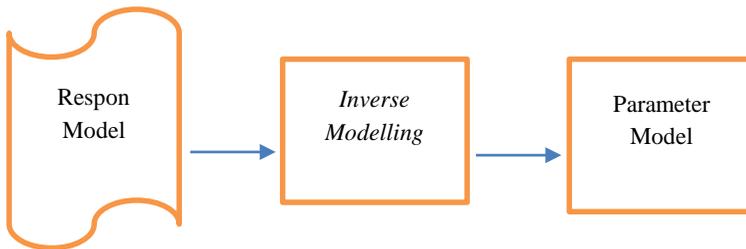
Gambar 2.7 Proses *forward modelling* (Menke, 2012)

Selain itu, pemodelan ke depan membutuhkan waktu yang relatif lama karena diperlukan ketelitian untuk menentukan parameter model dan juga perubahannya agar mendapatkan respon model yang baik (Grandis, 2009). Untuk mengatasi permasalahan permasalahan *forward modelling* di atas, maka dapat digunakan proses pemodelan ke belakang (*Inverse modelling*).

### 2.8.2 Pemodelan Ke belakang

Pemodelan ke belakang atau yang dikenal sebagai *inverse modelling* merupakan kesatuan teknik atau proses matematika dengan cara mereduksi data untuk mendapatkan informasi-informasi penting mengenai sistem fisika berdasarkan observasi

yang dilakukan (Menke, 2012). Pemodelan ke belakang merupakan kebalikan dari pemodelan ke depan karena parameter model akan didapatkan dari data pengamatan di lapangan. Dalam pemodelan ke belakang, proses yang sangat penting adalah mencari parameter model yang menghasilkan respon model dengan kecocokan (*fitness*) yang tinggi terhadap data pengamatan. Oleh karena itu, pemodelan ke belakang sering disebut sebagai *data fitting*. Kecocokkan antar respon model dengan model yang sebenarnya ditunjukkan oleh fungsi objektif yang harus diminimumkan. Fungsi objektif ini menggambarkan tingkat ketidakcocokan respon model dengan model pengamatan. Meminimumkan fungsi objektif ini berasosiasi dengan *fitness* yang tinggi (Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Proses *inverse modelling* (Menke, 2012)

## 2.9 Algoritma Genetik (*Genetic Algorithm*)

Algoritma genetik merupakan suatu teknik pencarian optimasi yang terinspirasi dari proses genetik dan seleksi alam yang dialami oleh makhluk hidup. Selain algoritma genetik banyak algoritma-algoritma optimasi lainnya yang terinspirasi dari makhluk hidup maupun alam di sekitar, di antaranya *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Simulted Annealing (SA)*, *Ant Colony Optimization (ACO)* dan *Dragonfly Algorithm (DA)*. Algoritma genetik memungkinkan populasi yang terdiri dari banyak individu yang akan melewati suatu proses genetik dan seleksi alam yang

berdasarkan kesesuaian individu-individu dalam populasi dengan alam. Kesesuaian ini disebut dengan *fitness*. Algoritma genetik ini pertama kali dikembangkan oleh John Holland di tahun 1975 dan dipopulerkan oleh salah seorang muridnya, David Goldberg, yang mampu mengatasi permasalahan sulit dalam disertasinya. Beberapa kelebihan Algoritma Genetik adalah sebagai berikut (Haupt and Haupt, 2004)

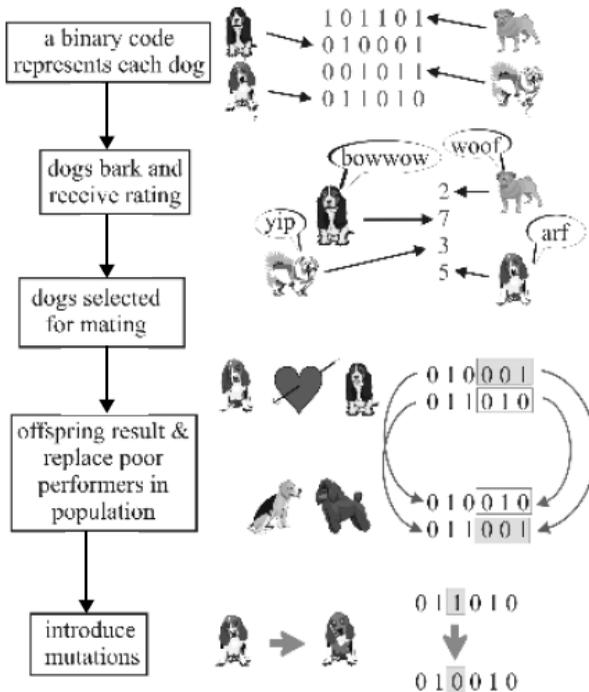
- Masalah optimasi dapat diselesaikan dengan variabel diskrit maupun kontinu,
- Tidak membutuhkan informasi fungsi turunan,
- Pencarian secara simultan dari ruang model yang luas,
- Dapat mengatasi masalah dengan jumlah variabel besar,
- Cocok untuk komputer parallel,
- Menyediakan suatu daftar variabel optimum, bukan hanya solusi tunggal,
- Variabel optimasi dengan harga permukaan kompleks yang ekstrim,
- Dapat bekerja dengan data yang dihasilkan secara numerik, data eksperimental, maupun data fungsi analisis.

Terdapat dua jenis Algoritma Genetik, yaitu Algoritma Genetik yang direpresentasikan dengan variabel biner dan Algoritma Genetik yang direpresentasikan dengan variabel kontinu. Namun, keduanya memiliki tujuan yang sama yaitu untuk meminimumkan fungsi objektif atau fungsi harga (*cost function*).

### **2.9.1 Algoritma Genetik dengan Variabel Biner**

Dalam Algoritma Genetik yang direpresentasikan dengan variabel biner, setiap individu dalam populasi awal dinyatakan dengan sejumlah bilangan biner. Sejumlah bilangan biner ini menyatakan karakteristik atau sifat yang dimiliki oleh individu tersebut. Hal ini dapat dianalogikan sebagai suatu populasi anjing yang terdiri dari individu-individu anjing yang berbeda dan tentunya dengan karakteristik yang berbeda (Gambar 2.9).

Karakteristik atau sifat ini berhubungan dengan kerasnya suara menggonggong anjing yang direpresentasikan oleh sejumlah



Gambar 2.9 Analogi Algoritma Genetik dengan variabel biner (Haupt and Haupt, 2004)

bilangan biner. Masing-masing anjing memiliki kekuatan suara yang berbeda sehingga antara satu anjing dengan anjing yang lainnya memiliki baris bilangan biner (*binary digit*) yang tersusun dari sejumlah bilangan biner berbeda. Jika ingin mencoba untuk mengembangbiakkan anjing-anjing dengan suara yang keras, maka akan dipilih anjing-anjing (dalam kasus ini dua dari empat anjing) dalam populasi tersebut dengan suara yang besar pula untuk dikembangbiakkan. Dalam pemilihan tersebut, harus

terdapat suatu cara untuk memilih anjing-anjing dengan suara yang keras misalnya dengan audisi. Sedangkan anjing-anjing dengan suara yang tidak keras tidak akan dipilih untuk dikembangkan. Anjing dengan suara yang keras akan menerima fungsi harga (*cost function*) yang rendah.

Setelah terpilih, anjing-anjing dengan suara yang besar tersebut secara acak akan berpasangan dan melakukan perkawinan, yang selanjutnya akan menghasilkan sepasang keturunan. Sepasang anak anjing yang dihasilkan memiliki kemungkinan bersuara keras karena kedua orangtuanya memiliki gen yang membuat mereka bersuara keras. Gen yang dimiliki oleh sepasang anak anjing tersebut berisi gen dari kedua orang tuanya dengan porsi tertentu. Gen tersebut diwariskan kepada keturunannya dengan cara persilangan gen kedua orangtuanya. Anak-anak anjing hasil perkawinan akan menggantikan anjing-anjing yang telah dieliminasi dan jumlah populasi akan kembali ke keadaan semula (Haupt and Haupt, 2004).

Orang tua yang telah menghasilkan keturunan dan ikut untuk generasi selanjutnya dapat mengalami mutasi. Dengan mutasi ini, diharapkan orangtua yang ikut generasi berikutnya memiliki sifat lebih baik dibandingkan generasi sebelumnya. Mutasi ditandai dengan berubahnya salah satu atau lebih bilangan biner pada baris bilangan biner yang dalam hal ini menyebabkan berubahnya karakteristik orangtua.

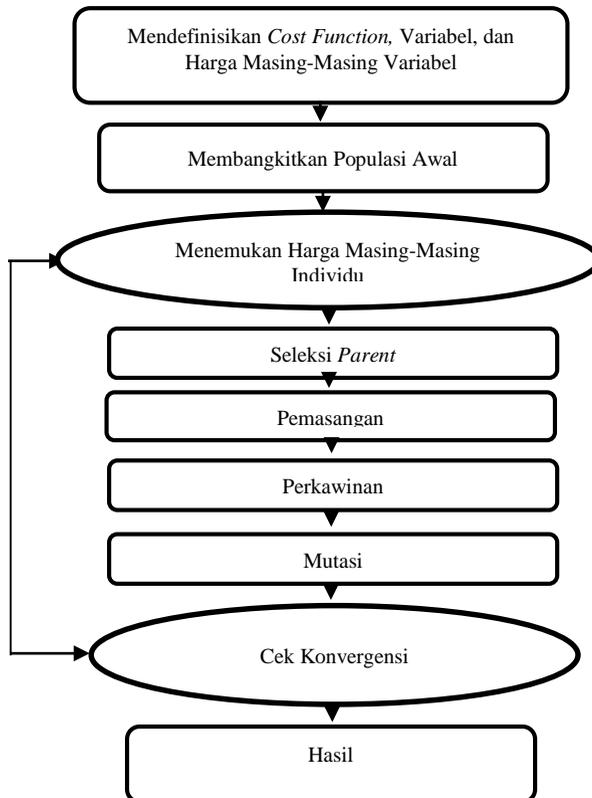
## **2.9.2 Algoritma Genetik dengan Variabel Real**

Dalam Algoritma Genetik dengan variable biner, terjadi beberapa permasalahan mengenai pembatasan kuantisasi. Hal ini akan muncul ketika dihadapkan dengan permasalahan optimasi yang menggunakan variabel kontinu. Jika tetap digunakan Algoritma Genetik dengan variable biner, maka akan diperlukan banyak bit (*binery digit*) untuk mewakili masing-masing variabel kontinu. Jika variabel kontinu dalam jumlah besar, maka jumlah bit yang diperlukan juga dalam jumlah besar.

Selain itu, membutuhkan ruang lebih untuk penyimpanan dan juga waktu yang dibutuhkan lebih lama bila dibandingkan dengan representasi dalam variabel kontinu (Haupt and Haupt, 2004). Permasalahan lainnya yang akan muncul yaitu ketidakmampuan untuk mencapai suatu presisi acak dalam solusi optimal karena dalam variabel biner, Algoritma Genetik memerlukan informasi tambahan (*a priori*) untuk mendapatkan solusi yang pasti. Semakin presisi solusi yang ingin didapatkan, maka akan semakin banyak pula bit yang digunakan dan akan semakin membuat komputasi semakin kompleks (Deb, 2002). Oleh karena itu, dibutuhkan kehadiran Algoritma Genetik dengan variabel kontinu. Algoritma genetik dengan variabel kontinu memiliki kelebihan dalam ruang penyimpanan yang lebih sedikit dan hasil keturunan yang didapatkan tidak perlu lagi harus diubah dari bilangan biner ke bilangan kontinu sehingga waktu yang dibutuhkan lebih sedikit (Haupt and Haupt, 2004).

Perbedaan utama Algoritma Genetik dengan variabel real terhadap Algoritma Genetik dengan variabel biner yaitu variabel tidak dinyatakan dengan bit-bit, namun dengan *floating point number*. Untuk proses lainnya, kedua jenis Algoritma Genetik tersebut sama. Diagram alir algoritma genetik dengan bilangan real ditunjukkan pada Gambar (2.10) (Haupt and Haupt, 2004).

Pada Algoritma Genetik dengan variabel real (Gambar 2.10), populasi awal yang dibangkitkan akan melalui proses seleksi orangtua, pemasangan, perkawinan, dan mutasi dalam bilangan real. Begitupun keturunan yang akan diikutkan pada generasi berikutnya langsung dalam bilangan real.



Gambar 2.10 Diagram alir Algoritma Genetik kontinu (Haupt and Haupt, 2004)

### 2.10 NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II*)

Kehadiran fungsi objektif jamak dalam suatu permasalahan optimasi menuntut dibutuhkannya algoritma yang dapat menyelesaikan permasalahan tersebut. Penyelesaian permasalahan multi-objektif dengan algoritma singel-objektif akan menemui beberapa kendala, diantaranya solusi sangat bergantung pada pemberat yang digunakan (Srinivas and Deb, 1995), solusi rawan terjebak pada minimum lokal dan ketidak-unikan yang tinggi (Dal Moro, 2010).

Deb et al (2002) mengembangkan algoritma multi-objektif berbasis Algoritma Genetik, yaitu *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II). Algoritma ini merupakan pengembangan algoritma singel-objektif karena kebutuhan untuk menemukan *Pareto-Optimal Solution* lebih dari satu untuk satu kali *run*. Beberapa peneliti telah menyarankan algoritma evolusi untuk permasalahan multi-objektif, diantaranya (Fonseca et al., 1993; Horn et al., 1994; Srinivas and Deb, 1995).

Prinsip NSGA-II hampir sama dengan AG, yang membedakannya adalah konsep *fast non-dominated sort* dan *crowding distance* pada NSGA-II. Konsep *fast non-dominated sort* bertujuan membandingkan solusi-solusi yang ada tiap generasi untuk mengetahui apakah solusi-solusi tersebut ada yang mendominasi atau tidak satu sama lainnya. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan semua solusi yang mungkin (*feasible solution*). Algoritma untuk *fast non-dominated sort* yaitu (Deb et al., 2002)

*Population P*

*For each*  $p \in P$

$S_p = \emptyset$

$N_p = 0$

*For each*  $q \in P$

*If* ( $p < q$ )

$S_p = S_p \cup q$

*Else if* ( $q < p$ )

$n_p = n_p + 1$

*if*  $n_p = 0$

$p_{rank} = 1$

$F_i = F_i \cup \{p\}$

$i = 1$

*while*  $F_i \neq \emptyset$

$Q = \emptyset$

*For each*  $p \in F_i$

*For each*  $q \in S_p$

$n_q = n_q - 1$

$$\begin{aligned}
& \text{if } n_q = 0 \\
& \quad q_{\text{rank}} = i + 1 \\
& \quad Q = Q \cup \{q\} \\
& i = i + 1 \\
& F_i = Q \tag{2.51}
\end{aligned}$$

Algoritma pada Persamaan (2.51) dapat dijelaskan berdasarkan Seshadri (2006). Untuk masing-masing solusi, maka ada dua besaran yang dihitung, yaitu  $n_p$  merupakan jumlah solusi yang mendominasi solusi  $p$  dan  $S_p$  merupakan satu set solusi yang didominasi oleh solusi  $p$ . Untuk level pertaman non-dominasi front, terdapat individu  $p$  dalam populasi  $P$ . Kemudian dilakukan inisiasi awal  $S_p = \emptyset$  dan  $n_p = 0$ , secara berturut-turut terdapat individu-individu yang didominasi oleh  $p$  dan jumlah yang mendominasi  $p$  adalah nol. Untuk setiap individu  $q$  yang merupakan anggota populasi  $P$ , jika  $p$  mendominasi  $q$ , maka  $q$  ditambahkan ke  $S_p$ . Sedangkan untuk  $q$  yang mendominasi  $p$ , maka  $n_p$  akan bertambah satu. Jika  $q$  tidak mendominasi  $p$  sama sekali yang berarti  $n_p = 0$ , maka  $p$  termasuk kedalam front pertama dan  $p$  diberi ranking satu. Penambahan  $p$  kedalam front pertama akan meng-*update* front pertama.

Inisiasi front  $i = 1$ . Ketika front ke- $i$  tidak nol, maka dilakukan inisiasi  $Q = \emptyset$  yang berfungsi untuk menyimpan anggota front selanjutnya. Untuk  $p$  anggota  $F_i$  dan  $q$  anggota  $S_p$ ,  $p$  yang mendominasi  $q$  akan membuat  $n_q$  berkurang satu. Apabila  $n_q$  bernilai nol yang berarti tidak ada yang mendominasi  $q$ , maka populasi  $Q$  akan di-*update* dengan penambahan  $q$  dan  $q$  diberi ranking  $q_{\text{rank}} = i + 1$ . Kemudian, untuk front berikutnya  $i = i + 1$  maka  $Q$  menjadi front berikutnya dan proses yang sama akan diulangi.

Fungsi *crowding distance* menyatakan seberapa dekat individu satu dengan individu lain disebelahnya. Semakin besar rata-rata nilai *crowding distance*, maka akan menghasilkan diversitas lebih besar dalam populasi. Algoritmanya adalah sebagai berikut

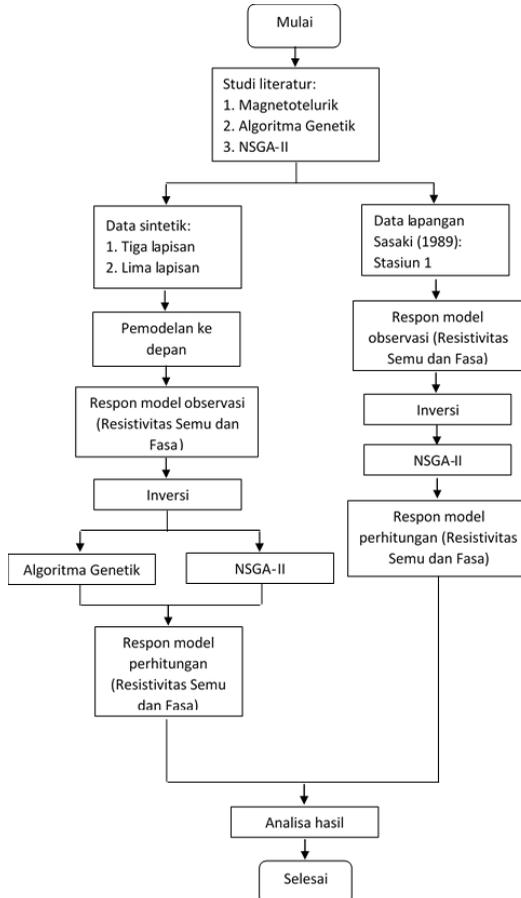
$$\begin{aligned}
l &= |I| \\
\text{for each } i, \text{ set } I[i]_{\text{distance}} &= 0 \\
\text{for each objective } m & \\
I &= \text{sort}(I, m) \\
I[1]_{\text{distance}} = I[l]_{\text{distance}} &= \infty \\
\text{For } I = 2 \text{ to } (l-1) & \\
I[i]_{\text{distance}} = I[i]_{\text{distance}} + (I[i+1].m - I[i-1].m) / (f_m^{\text{max}} - f_m^{\text{min}}) & \\
\end{aligned}
\tag{2.52}$$

Pada Persamaan (2.52), untuk tiap front  $F_i$ , inisiasi jarak semua individu sama dengan nol. Untuk setiap fungsi objektif, individu diurutkan berdasarkan nilai objektif  $m$ . Masing-masing individu diberikan jarak tak hingga ( $\infty$ ) untuk nilai batas. Untuk semua individu, dapat dihitung jaraknya antara individu lain dengan melibatkan individu-individu di sisi kanan dan kiri pada front yang sama.

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini dapat digambarkan sebagaimana Gambar 3.1.

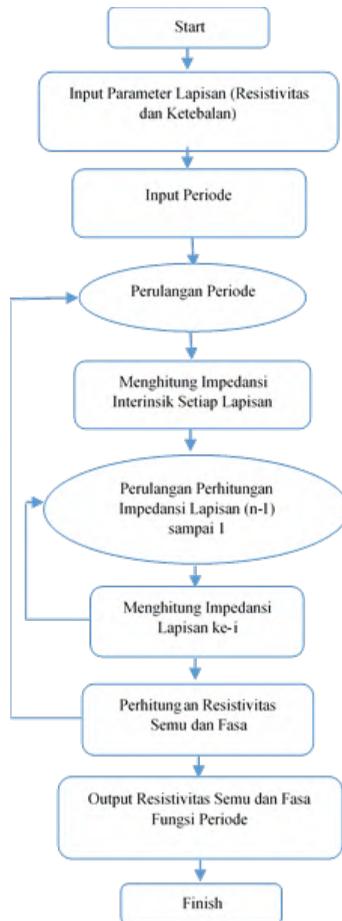


Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian inversi MT satu dimensi

### 3.2 Pemodelan Ke depan Magnetotelurik Satu Dimensi

Dalam pemodelan Magnetotelurik satu dimensi, bumi dianggap sebagai medium satu dimensi yang bersifat homogen berlapis *half space* di mana resistivitas hanya bervariasi terhadap kedalaman dan diskontinuitas resistivitas hanya terletak pada batas udara dengan lapisan *half space* (Simpson and Bahr, 2005). Parameter model yang digunakan dalam studi Magnetotelurik satu dimensi ini adalah resistivitas ( $\rho_i$  dengan  $i = 1,2,3,\dots,n$ ) dan ketebalan ( $h_i$  dengan  $i = 1,2,3,\dots,n-1$ ) untuk masing-masing lapisan. *Forward Modelling* untuk Magnetotelurik satu dimensi didasarkan pada Persamaan Maxwell hingga didapatkannya Persamaan Rekursif (Persamaan 2.46). Persamaan Rekursif merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung impedansi lapisan yang dimulai dari lapisan terakhir sampai lapisan pertama. Algoritma perhitungan pemodelan kedepan Magnetotelurik satu dimensi (Grandis, 2009) disajikan pada Gambar (3.2).

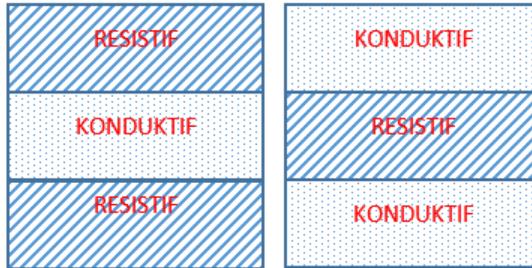
Pada diagram alir (Gambar 3.2), untuk membuat model Magnetotelurik satu dimensi dengan menggunakan data sintetik, maka ditentukan terlebih dahulu model lapisan yang akan digunakan. Model lapisan yang dibuat memiliki parameter model resistivitas dan ketebalan untuk masing-masing lapisan. Selain parameter model yang digunakan sebagai input awal dalam membuat data sintetik, digunakan juga input periode sinyal Magnetotelurik yaitu  $10^{-3}$  sampai  $10^3$  s. Periode ini merupakan periode sinyal Magnetotelurik yang dapat dipelajari (Chave and Jones, 2012). Input periode ini dilakukan karena resistivitas semu dan fasa merupakan fungsi dari periode. Kemudian dilakukan perhitungan terhadap semua impedansi interinsik masing-masing lapisan. Impedansi interinsik ini merupakan impedansi yang dimiliki oleh masing-masing lapisan. Lalu, dilakukan perhitungan impedansi yang dimulai dari lapisan terakhir ( $n$ ) dengan menganggap bahwa impedansi lapisan terakhir atau lapisan *half space* adalah impedansi interinsiknya.



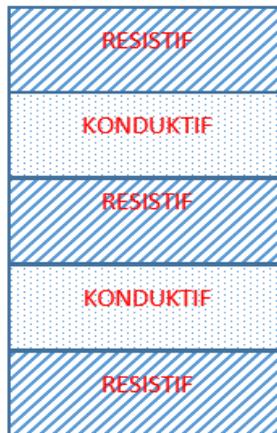
Gambar 3.2 Diagram alir pemodelan ke depan Magnetotelurik satu dimensi (Grandis, 2009)

Setelah mendapatkan impedansi interinsik lapisan terakhir, maka dapat dihitung impedansi lapisan di atas lapisan terakhir ( $n-1$ ) dengan melibatkan impedansi lapisan terakhir dan impedansi interinsik lapisan di atas lapisan terakhir. Hal ini terus berlanjut hingga menghasilkan perhitungan impedansi pada

lapisan pertama untuk periode pertama yang digunakan. Untuk periode kedua dan selanjutnya, diulangi perhitungan sama seperti perhitungan periode pertama untuk mendapatkan impedansi lapisan pertama. Impedansi dapat dinyatakan sebagai resistivitas semu dan fasa sebagai fungsi periode kedua dan seterusnya.



Gambar 3.3 Model sintetik dengan tiga lapisan (a) resistif diantar konduktif (b) konduktif diantar resistif



Gambar 3.4 Model sintetik dengan lima lapisan, resistif konduktif -resistif-konduktif-resistif

Dalam penelitian ini, digunakan tiga model sintetik yaitu dua model terdiri dari tiga lapisan (Gambar 3.3) dan satu model

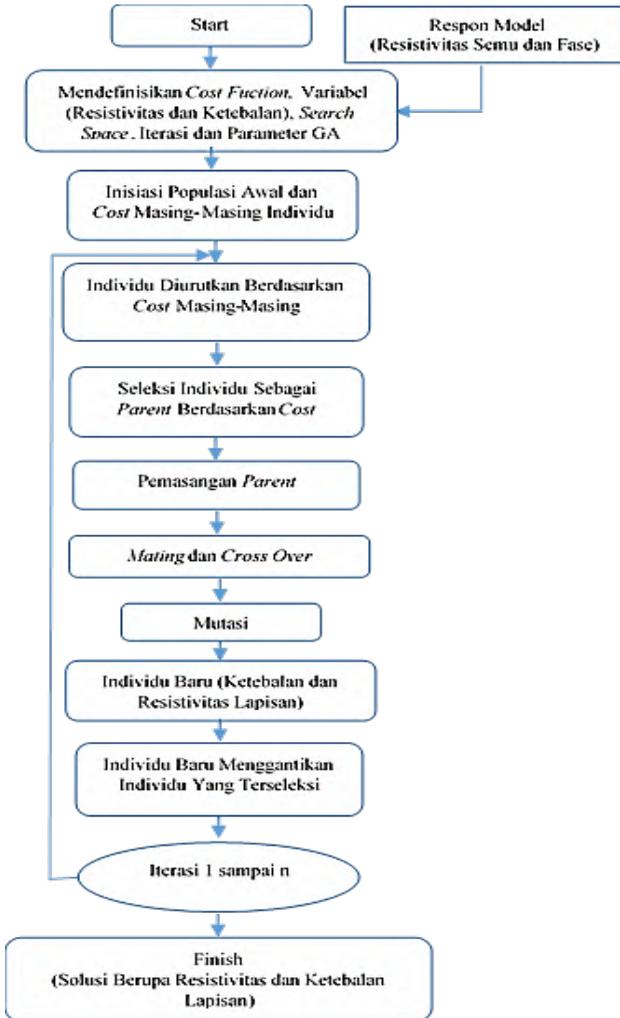
lainnya terdiri dari lima lapisan (Gambar 3.4). Untuk dua model yang terdiri dari tiga lapisan, satu model terdiri dari lapisan konduktif di antara lapisan resistif dan lainnya terdiri dari lapisan resistif di antara lapisan konduktif. Sedangkan untuk model lima lapisan, terdiri dari lapisan resistif-konduktif-resistif-konduktif-resistif. Model-model lapisan ini digunakan untuk mempelajari respon model berupa resistivitas semu dan fasa yang mungkin akan ditemukan di lapangan serta menguji algoritma sebelum diaplikasikan pada data sesungguhnya.

### **3.3 Inversi Algoritma Genetik Kontinu**

Banyak algoritma-algoritma yang dikembangkan saat ini terinspirasi dari fenomena-fenomena alam yang sering terjadi di sekitar kita, salah satunya adalah Algoritma Genetik (*Genetic Algorithm*). Algoritma Genetik merupakan suatu algoritma pencarian terarah yang digunakan untuk mengatasi masalah inversi non-linear. Algoritma ini menyelesaikan suatu permasalahan inversi non-linear dengan pendekatan global yaitu menyelesaikan masalah inversi non-linear dengan teknik non-linear pula. Hal ini lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan penyelesaian masalah inversi non-linear dengan pendekatan lokal karena kita harus menentukan model awal yang cukup dekat dengan solusi yang kita inginkan agar solusinya sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan penelitian. Oleh karena itu, sangat dibutuhkan suatu informasi tambahan (*a priori*) untuk model awal (Grandis, 2009). Selain itu nantinya solusi inversi rawan terjebak pada minimum lokal dan bukan minimum global yang mengakibatkan tidak didapatkannya solusi optimum yang diinginkan (Menke, 2012)

Dalam penelitian ini digunakan Algoritma Genetik Kontinu atau dengan menggunakan kode real. Menurut Deb et al, (1995), Algoritma Genetik dengan kode real dapat mengatasi permasalahan yang melibatkan ruang pencarian yang kontinu. Algoritma genetik kode real memiliki perbedaan dengan biner kode dalam pengkodean variable-variabel dalam suatu

permasalahan. Selain itu, Algoritma Genetik dengan kode biner membutuhkan waktu yang lebih lama dalam proses karena



Gambar 3.5 Diagram alir inversi Magnetotelurik satu dimensi dengan Algoritma Genetik Kode Real

variabel-variabel awal sebagai input terlebih dahulu dirubah dalam sejumlah bilangan biner (*bit*) dan hasilnya juga harus dirubah kembali dari bilangan biner ke bilangan real agar dapat melakukan analisa hasil yang didapat. Selain itu juga kode biner membutuhkan ruang penyimpanan lebih besar bila permasalahan melibatkan variabel-variabel dalam jumlah banyak (Haupt and Haupt, 2004).

Algoritma Genetik yang digunakan dalam penelitian ini bertujuan menyelesaikan permasalahan inversi non-linear Magnetotelurik satu dimensi. Terlebih dahulu dilakukan suatu validasi untuk mengetahui keberhasilan Algoritma Genetik dalam mengatasi masalah optimasi yaitu menentukan nilai minimum global dari suatu permasalahan multimodal (Sungkono, 2011). Kemudian, Algoritma Genetik akan diterapkan pada data sintetik Magnetotelurik satu dimensi dengan empat macam model lapisan untuk mengetahui kemampuan Algoritma Genetik untuk mengatasi permasalahan inversi non-linear Magnetotelurik satu dimensi. Diagram alir inversi Magnetotelurik satu dimensi dengan menggunakan Algoritma Genetik ditunjukkan pada Gambar (3.5). Gambar (3.5) ini merupakan penjabaran proses inversi dengan Algoritma Genetik pada Gambar (3.1) yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. **Mendefinisikan *cost function*, variabel, *search space*, iterasi, dan parameter GA.**

Pada tahap ini, dilakukan pendefinisian *cost function* atau yang lebih sering disebut sebagai fungsi objektif. Fungsi objektif merupakan suatu fungsi *misfit* yang akan diminimumkan dalam inversi Algoritma Genetik. Fungsi objektif ini akan mendefinisikan harga untuk masing-masing individu sehingga fungsi objektif ini berkaitan dengan variabel mana yang akan dipilih dan menjalani proses-proses selanjutnya untuk menghasilkan individu-individu baru yang diharapkan lebih baik dari individu yang terseleksi sebelumnya. Fungsi objektif untuk masing-masing permasalahan berbeda. Untuk inversi

Magnetotelurik satu dimensi, maka fungsi objektifnya adalah (Grandis, 2009).

$$S_e = \left( \left( \log \left( \frac{\rho_{cal}}{\rho_{obs}} \right) \right)^2 + \lambda (\Phi_{cal} - \Phi_{obs})^2 \right) \quad (3.1)$$

Namun, menurut Grandis (2009), terdapat alternatif untuk menghitung nilai *misfit* yaitu dengan *root mean square* (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{ND} S_e} \quad (3.2)$$

dengan  $ND$  merupakan banyaknya data. Menurut Grandis (2009),  $\lambda$  merupakan suatu faktor pembobot yang digunakan untuk pembobot fasa. Faktor pembobot ini dipilih berdasarkan kasus yang sedang dihadapi. Variabel yang digunakan disini adalah variabel resistivitas dan ketebalan masing-masing lapisan dan ruang pencarian atau *search space* merupakan ruang yang dibatasi nilai tertinggi dan terendah masing-masing variabel sehingga pencarian lebih terarah. Iterasi digunakan untuk menentukan jumlah generasi yang terlibat dalam proses (Haupt and Haupt, 2004). Iterasi memberikan kesempatan lebih banyak untuk mendapatkan individu yang lebih baik dari generasi ke generasi sehingga hasil yang didapatkan nantinya makin mendekati parameter model.

## 2. Inisiasi Populasi awal dan *cost* masing-masing

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, Algoritma Genetik merupakan suatu teknik pencarian terarah dengan cara pencarian pada suatu ruang samping untuk mendapatkan hasil yang optimum global (Sungkono, 2011). Individu dibangkitkan secara acak dengan memiliki harganya masing-masing yang didapatkan dari fungsi

objektif. Harga untuk masing-masing individu sangat berguna untuk menentukan individu mana yang lolos dari proses “seleksi” untuk ke tahap berikutnya. Individu tersebut terdiri dari variabel-variabel yang telah didefinisikan sebelumnya.

**3. Individu diurutkan berdasarkan *cost* masing-masing dan seleksi untuk memilih individu yang menjadi *parent*.**

Untuk menjadi orang tua, individu-individu yang telah dibangkitkan diurutkan berdasarkan harga masing-masing individu, diurutkan dari harga yang terendah sampai harga yang tertinggi. Seleksi secara alami dapat ditentukan dengan cara menggunakan rasio seleksi, yaitu suatu perbandingan antara populasi yang tetap bertahan terhadap populasi yang disingkirkan. Menurut Haupt and Haupt (2004), terlalu sedikit individu yang dibiarkan bertahan hidup akan membuat generasi berikutnya terbatas dalam jumlah individu, namun terlalu banyak juga akan membuat performa yang buruk untuk generasi selanjutnya. Maka, ditetapkan rasio seleksi sebesar 50%.

**4. Pemasangan, *mating*, *crossover*, dan mutasi**

Setelah individu-individu terpilih, maka individu tersebut akan dipasangkan. Dua individu akan dipasangkan untuk menghasilkan sepasang keturunan yang baru untuk menggantikan individu yang telah disingkirkan pada proses seleksi. Sepasang keturunan baru tersebut mewarisi sifat dari kedua orangtuanya lewat proses *crossover*. Dari proses *crossover* ini diharapkan sepasang keturunan tersebut memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan individu-individu terdahulu karena mereka mendapatkan sifat (gen) dari kedua orangtuanya yang merupakan individu terbaik. Proses selanjutnya yaitu mutasi. Proses mutasi membuat Genetik Algoritma konvergen terlalu

cepat pada suatu daerah dengan harga tertentu. Hal ini bagus apabila daerahnya merupakan daerah global optimum. Namun, seringkali daerahnya merupakan daerah global minimum. Oleh karena itu, mutasi ini diaplikasikan pada sepasang keturunan tersebut dengan tujuan mampu mencari atau mengeksplor daerah-daerah lain untuk mendapatkan daerah optimum global (Haupt and Haupt, 2004).

#### **5. Individu baru menggantikan individu yang tidak terseleksi dan Iterasi Menyatakan Jumlah Generasi**

Sepasang keturunan baru yang telah melewati proses akan menjadi individu baru dan menggantikan individu dari generasi sebelumnya yang tidak terseleksi karena memiliki harga yang besar. Untuk setiap generasi, jumlah individu dipertahankan dengan jumlah yang sama. Oleh karena itu, setiap generasi akan menghasilkan individu baru sejumlah individu yang terbuang karena proses seleksi. Iterasi berfungsi menentukan jumlah generasi. Semakin banyak generasi, maka semakin baik hasilnya.

#### **6. Output (Resistivitas dan Fasa)**

Output yang didapatkan adalah populasi yang terdiri dari sejumlah individu. Individu-individu tersebut mengandung variabel-variabel dimana dalam kasus inversi Magnetotelurik 10 dimensi merupakan resistivitas dan ketebalan masing-masing lapisan. Individu-individu tersebut diurutkan berdasarkan harga *misfit* rendah ke tinggi yang berasosiasi dengan parameter model yang fit.

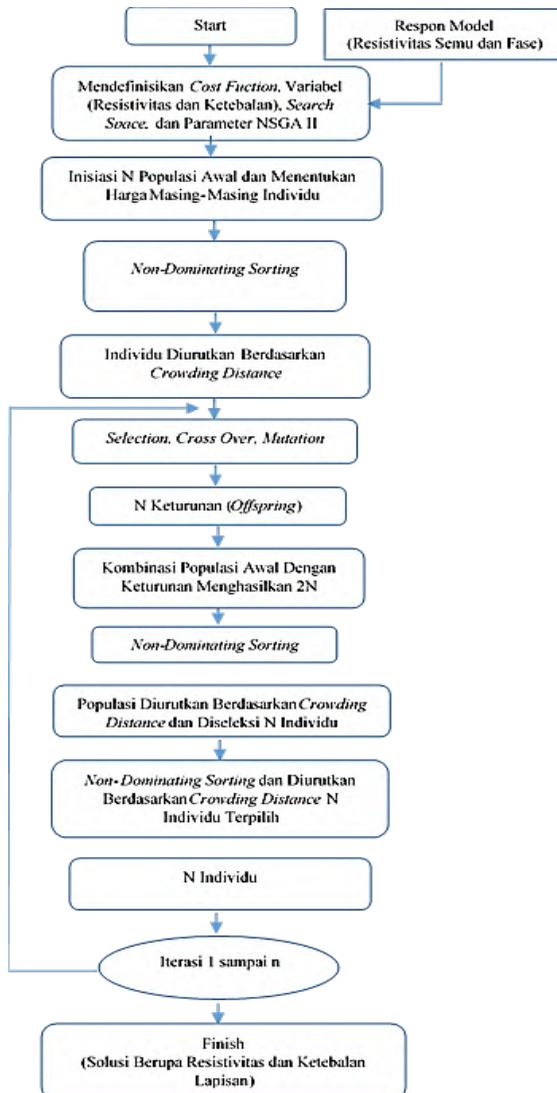
### **3.4 Inversi NSGA-II**

Pada sub-bab sebelumnya, telah dijelaskan mengenai inversi Algoritma Genetik dengan meminimumkan satu fungsi objektif yang dalam permasalahan inversi Magnetotelurik satu dimensi, fungsi

objektif tersebut adalah penjumlahan kuadrat selisih resistivitas semu dan selisih fasa antara data perhitungan dan data pengamatan seperti yang diperlihatkan pada Persamaan (4.1) diatas. Namun, ketika diamati, ini bukanlah masalah inversi dengan satu fungsi objektif, namun terdapat dua fungsi objektif yang harus diminimumkan secara bersama. Metode optimasi klasik mengubah permasalahan optimasi multi objektif ke dalam permasalahan optimasi singel objektif seperti pada Algoritma Genetik. Seperti yang dikemukakan oleh Deb et al (2002), ketika permasalahan multi objektif dijadikan permasalahan singel objektif, maka harus di *run* berulang kali dengan harapan mendapatkan solusi yang berbeda. Selain itu, permasalahan lainnya yang dihadapi adalah adanya factor pembobot yang merupakan prinsip coba-coba untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

Dalam penelitian ini, selain digunakan Algoritma Genetik, juga digunakan NSGA-II untuk inversi Magnetotelurik satu dimensi. NSGA-II merupakan suatu metode optimasi berdasarkan algoritma genetik namun memiliki perbedaan pada operator seleksi yang digunakan. NSGA-II memiliki konsep *fast non-dominated sorting* dan *crowding distance*. Konsep *fast non-dominated sorting* memberi peringkat pada solusi-solusi dengan membandingkan suatu solusi dengan solusi lainnya untuk mengetahui solusi tersebut mendominasi yang lainnya ataupun tidak. Jika tidak mendominasi, maka akan ditempatkan pada front selanjutnya untuk melakukan proses *crossover* dan mutasi. Konsep ini dijelaskan pada Persamaan (2.51). Selain itu konsep *crowding distance* berfungsi untuk mengetahui jarak antara satu solusi dengan solusi yang lainnya yang berhubungan dengan diversitas solusi-solusi tersebut (Deb et al, 2002). Konsep ini dijelaskan pada Persamaan (2.52). Kemudian, dengan dua konsep tersebut, maka solusi-solusi akan diseleksi.

Solusi-solusi yang berbeda front akan dipilih berdasarkan peringkat yang terendah. Sedangkan untuk solusi-solusi yang berada pada satu front, solusi yang memiliki *crowding distance* yang kecil berasosiasi dengan diversitas yang tinggi. Diagram alir inversi Magnetotelurik satu dimensi dengan menggunakan NSGA-II, sebagaimana Gambar (3.6) yaitu



Gambar 3.6 Diagram alir inversi Magnetotelurik satu dimensi dengan NSGA-II

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 *Forward Modelling Magnetotelurik Satu Dimensi*

Dalam menguji kemampuan AG untuk objektif tunggal dan AG untuk objektif jamak (NSGA-II) dalam inversi data Magnetotelurik satu dimensi, maka kedua algoritma tersebut dapat diaplikasikan pada data sintetik. Terdapat beberapa data sintetik bebas *noise* yang digunakan untuk menguji kemampuan kedua algoritma tersebut, yaitu model tiga lapisan dan lima lapisan (Tabel 4.1). Kemudian algoritma yang mampu untuk menangani masalah inversi multi-objektif diaplikasikan pada data sesungguhnya yang didapatkan dari Sasaki (1989).

Tabel 4.1 Model lapis bumi

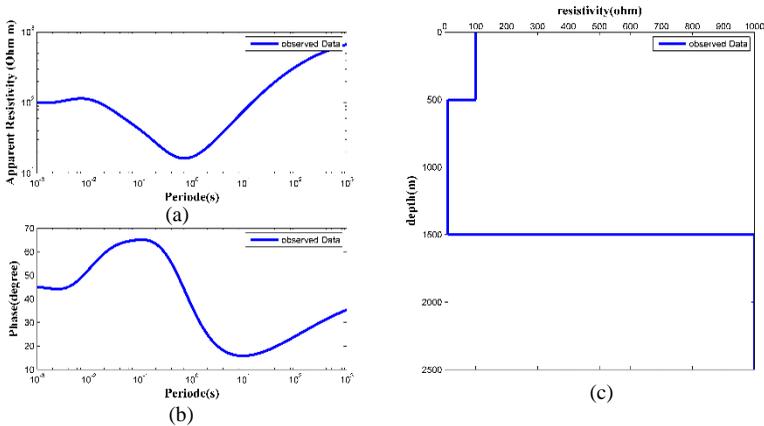
Jumlah Lapisan	Model Lapisan	Ketebalan (m)	Resistivitas (ohm m)
Tiga Lapisan	Resistif-Konduktif Resistif	500	100
			10
	Konduktif-Resistif- Konduktif	1000	1000
			100
Lima Lapisan	Resistif-Konduktif Resistif-Konduktif- Resistif	600	250
		1391	25
		3794	100
	4000	10	
			25

#### 4.1.1 Model Bumi Tiga Lapisan *Half Space*

Dalam pemodelan geofisika, model merepresentasikan distribusi sifat fisika bawah permukaan. Menurut Grandis (2009), jika parameter model merupakan kuantitas sejenis, dalam kasus MT satu dimensi yaitu tahanan jenis, maka parameter model

bersifat homogen. Parameter model akan berasosiasi dengan suatu geometri yang tetap, misalnya pada model satu dimensi adalah lapisan bumi dimana sifat fisika hanya bervariasi terhadap kedalaman.

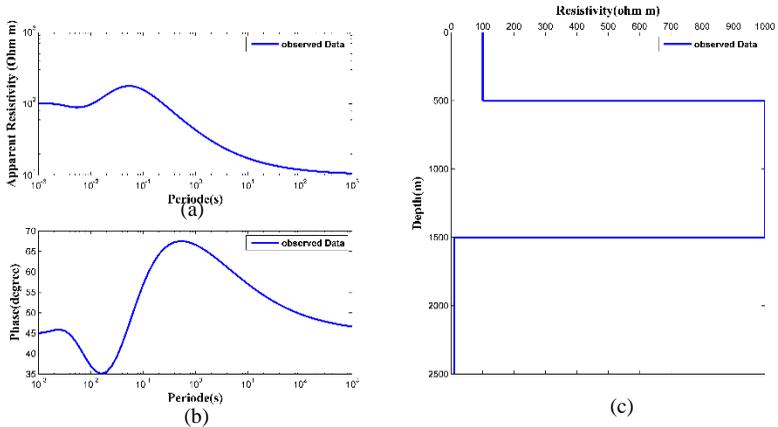
Model bumi yang akan digunakan pertama adalah model bumi tiga lapis *half space*. Untuk model bumi tiga lapis *half space* terdapat dua model, yaitu model lapisan konduktif di antara lapisan resistif dan lapisan resistif di antara lapisan konduktif. Model ini disarankan oleh Grandis (2009) agar memudahkan dalam melihat respon model dari dua model yang berbeda. Respon model yang dihasilkan oleh kedua model ditunjukkan pada Gambar (4.1) dan (4.2).



Gambar 4.1 *Forward modelling* tiga lapisan, konduktif di antara resistif

Dalam investigasi MT, parameter yang diukur secara simultan adalah medan listrik dan medan magnet yang bervariasi terhadap waktu. Kedua parameter tersebut dinyatakan dalam suatu perbandingan medan listrik terhadap medan magnet sebagai impedansi ( $Z$ ). Impedansi ini menyatakan hambatan yang diberikan medium ketika gelombang elektromagnetik merambat melewatinya. Semakin besar nilai resistivitas medium maka nilai

impedansinya akan semakin besar juga, begitu pula sebaliknya. Dalam pemodelan MT satu dimensi, impedansi dapat dinyatakan sebagai resistivitas semu dan fasa sebagaimana pada Gambar (4.1) dan (4.2).



Gambar 4.2 *Forward modelling* tiga lapisan, resistif di antara konduktif

Respon model yaitu resistivitas semu (Gambar 4.1a dan 4.2a) dan fasa (Gambar 4.1b dan 4.2b) didapatkan dari pemecahan Persamaan Maxwell yang dinyatakan dalam Persamaan Rekursif (2.47). Dalam Persamaan (2.47), perhitungan impedansi dimulai dari lapisan terakhir yang merupakan *half space*. Kemudian dihitung impedansi lapisan di atasnya dengan melibatkan lapisan di bawahnya yang merupakan *half space*. Perhitungan yang serupa dilanjutkan sampai lapisan pertama sehingga didapatkan nilai impedansi total ketiga lapisan tersebut. Impedansi dapat dinyatakan dalam bentuk resistivitas semu dan fasa menggunakan Persamaan (2.49) dan (2.50). Sehingga kurva resistivitas semu dan fasa yang didapat menggambarkan kondisi masing-masing lapisan.

Pada Gambar (4.1c) dan (4.2c), nilai resistivitas hanya bervariasi terhadap kedalaman. Namun dalam kenyataannya bumi

merupakan medium *inhomogen-anisotropy*. Oleh karena itu, dalam satu lapisan terdapat berbagai macam batuan yang membuat nilai resistivitasnya tidak sama di setiap bagian. Namun kembali lagi pada asumsi dasar yang dinyatakan oleh Simpson and Bahr (2005) mengenai studi MT satu dimensi bahwa resistivitas satu lapisan seragam pada setiap bagian sehingga resistivitas hanya akan bervariasi terhadap lapisan yang berbeda atau kedalaman. Nilai resistivitas yang mewakili masing-masing lapisan merupakan nilai resistivitas batuan yang dominan dalam lapisan tersebut, misalnya lapisan yang diwakili suatu nilai resistivitas rendah berarti dalam lapisan tersebut didominasi oleh batuan-batuan dengan resistivitas yang rendah.

Kurva resistivitas semu sebagai fungsi periode dapat menunjukkan lapisan dengan nilai resistivitas yang kontras dibandingkan dengan lapisan-lapisan lainnya. Pada Gambar (4.1a) menunjukkan bahwa zona konduktif memiliki nilai resistivitas semu yang rendah. Hal ini disebabkan adanya lapisan kedua yang memiliki nilai resistivitas lebih rendah dibandingkan lapisan pertama dan ketiga. Hal sebaliknya terjadi pada kasus sebagaimana ditunjukkan Gambar (4.2a) dimana zona resistif ditandai dengan nilai resistivitas semu yang tinggi.

Gambar (4.1a) dan (4.2a) dapat dijelaskan secara matematis dengan Persamaan (2.49). Besar kecilnya nilai resistivitas semu dipengaruhi oleh nilai impedansi, sedangkan nilai impedansi sebanding dengan nilai resistivitas sebenarnya. Oleh karena itu, semakin besar nilai impedansi menyebabkan nilai resistivitas semunya semakin besar pula, begitupun sebaliknya.

Kurva fasa sebagai fungsi periode (Gambar 4.1b dan 4.2b) dapat menunjukkan medium yang dilalui gelombang elektromagnetik. Ketika terjadi perubahan fasa yang awalnya tinggi menuju rendah atau sebaliknya, maka menandakan pergantian medium yang dilalui gelombang elektromagnetik. Hal ini dapat memberikan informasi awal mengenai jumlah lapisan yang akan berguna dalam proses inversi data MT satu dimensi. Secara fisis, hal ini disebabkan adanya keterlambatan medan listrik

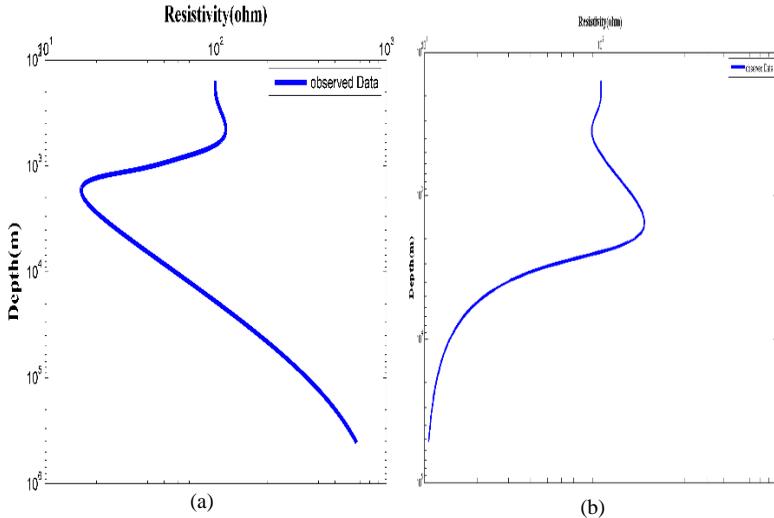
terhadap medan magnet atau sebaliknya ketika gelombang elektromagnetik berpindah dari medium resistif ke medium konduktif atau sebaliknya. Keterlambatan ini dapat ditunjukkan secara matematis melalui Persamaan (2.36) dan (2.37).

Menurut Simpson and Bahr (2005), keterlambatan medan listrik terhadap medan magnet dalam medium *half space* sebesar  $45^{\circ}$ . Hal ini dapat dilihat pada Gambar (4.1b dan 4.2b), ketika gelombang elektromagnetik merambat pada medium *half space*, maka kurva menunjukkan nilai fasa sebesar  $45^{\circ}$ . Kemudian gelombang elektromagnetik akan melewati medium resistif atau konduktif yang menyebabkan nilai fasa berubah dan akan kembali mendekati fasa sebesar  $45^{\circ}$  ketika gelombang elektromagnetik sampai pada permukaan bumi.

Namun menurut Telford (2004), kurva fasa tidak terlalu banyak digunakan dalam investigasi MT. Biasanya data fasa digunakan untuk verifikasi atau memperkuat hasil data resistivitas. Hal ini disebabkan karena kesulitan untuk memperoleh pengukuran fasa yang pasti dan dapat diandalkan untuk setiap keadaan. Fasa yang tidak terlalu diperhatikan ini merupakan suatu hal yang disayangkan karena informasi yang berasal dari fasa ini sangat berguna untuk informasi mengenai kondisi bawah permukaan.

Metode pasif elektromagnetik merupakan metode investigasi geofisika yang sangat menguntungkan jika ditinjau dari kedalaman investigasi. Apabila dibandingkan dengan metode pasif elektromagnetik lainnya (elektromagnetik dan *VLf-EM*), MT dapat mencapai kedalaman yang lebih besar. Hal ini terlihat pada kurva resistivitas terhadap kedalaman (Gambar 4.3a dan b) hasil pemodelan kedepan MT satu dimensi. Dari kedua kurva tersebut, terlihat bahwa penetrasi kedalaman investigasi MT dapat mencapai  $10^5$  m. Oleh karena itu, metode MT banyak dimanfaatkan untuk eksplorasi yang memerlukan cakupan kedalaman yang besar, yaitu mineral, tambang, dan panas bumi. Kedalaman penetrasi MT berhingga. Hal ini dikarenakan asumsi dasar MT satu dimensi yaitu menggunakan gelombang

elektromagnetik bumi yang diinduksi dari luar bumi dan bukan merupakan medan alami bumi sendiri (Simpson and Bahr, 2005).



Gambar 4.3 Penetrasi kedalaman untuk model tiga lapis, (a) konduktif diantar resistif (b) resistif di antara konduktif

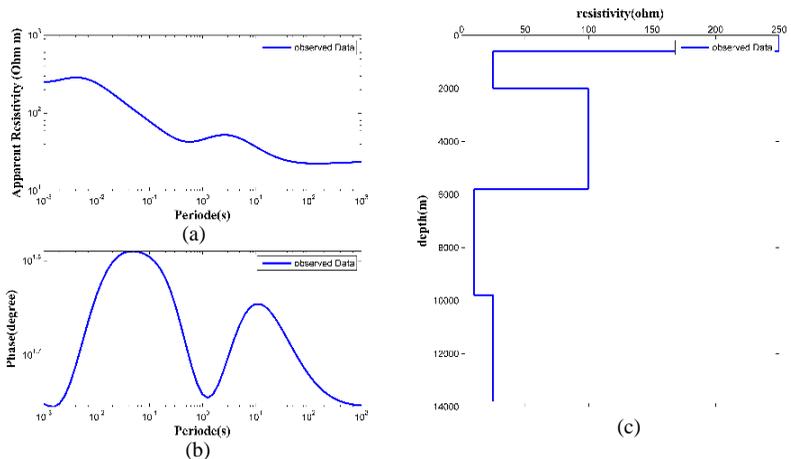
Kedalaman penetrasi MT didekati dengan Persamaan (2.2). Penggunaan range frekuensi dalam survei MT dapat disesuaikan dengan kedalaman yang ingin diinvestigasi (Kearey et al., 2002). Selain frekuensi yang digunakan, nilai resistivitas semu medium juga mempengaruhi besar penetrasi kedalaman. Semakin besar nilai resistivitas semu suatu medium, maka semakin dalam penetrasi yang dapat dicapai. Secara fisis, medium resistif akan membuat gelombang elektromagnetik tidak terpecah saat merambat pada medium tersebut, sehingga gelombang elektromagnetik mampu mencapai kedalaman yang besar (Telford, 2004).

Saat proses inversi data lapangan MT, parameter bawah permukaan yaitu resistivitas dan ketebalan lapisan tidak diketahui.

Hal ini akan menyulitkan untuk menentukan *search space* dalam proses inversi. Untuk itu ruang model dapat diketahui dari kurva penetrasi kedalaman gelombang elektromagnetik. Selain untuk menentukan batas-batas ruang pencarian, kurva penetrasi kedalaman juga dapat memberikan informasi mengenai perkiraan jumlah lapisan yang akan bermanfaat sebagai jumlah variabel dalam proses inversi.

#### 4.1.2 Model Bumi Lima Lapisan *Half Space*

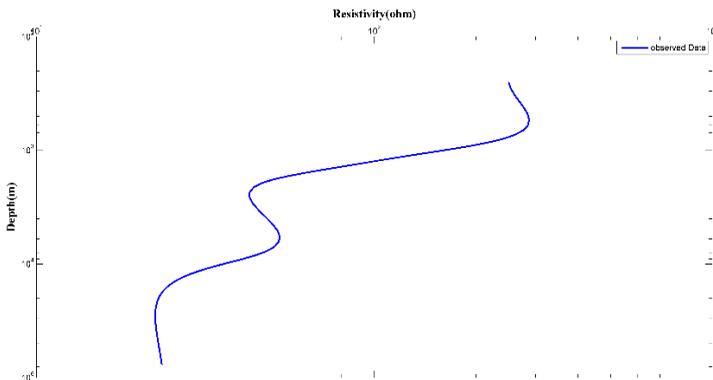
Untuk model bumi lima lapis *half space*, maka dibuat satu model yang terdapat pada Tabel 4.1. Tujuannya untuk menunjukkan bagaimana respon kedua algoritma untuk menyelesaikan masalah inversi MT satu dimensi dengan lebih banyak lapisan. Hal ini sangat diperlukan karena dalam kenyataannya, bumi terdiri dari lapisan-lapisan dengan resistivitas yang berbeda-beda. Tidak hanya antar lapisan saja, namun antara satu bagian dengan bagian lainnya yang terletak pada lapisan yang sama memiliki resistivitas yang berbeda walaupun tidak terlalu kontras.



Gambar 4.4 *Forward modelling* lima lapisan, resistif-konduktif resistif-konduktif-resistif

Gambar (4.4) menunjukkan pemodelan kedepan dengan model bumi lima lapis. Pada kurva resistivitas semu terhadap periode (Gambar 4.4a), nilai resistivitas semu yang tinggi menunjukkan lapisan resistif dan nilai rendah menunjukkan lapisan konduktif. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kurva resistivitas semu didukung oleh kurva fasa (Gambar 4.4b) yang dijadikan data verifikasi untuk mengetahui perpindahan medium yang dilalui gelombang elektromagnetik.

Dalam inversi data MT satu dimensi, kesulitan dalam mengestimasi jumlah dan nilai resistivitas lapisan dapat diatasi dengan memperhatikan kurva penetrasi kedalaman. Untuk model lima lapis bumi, penetrasi kedalaman ditunjukkan pada Gambar (4.5).



Gambar 4.5 Penetrasi kedalaman model lima lapisan, resistif-konduktif-resistif-konduktif-restif

## 4.2 Inversi Magnetotelurik Satu Dimensi Menggunakan AG

Untuk menguji kemampuan algoritma, maka dilakukan pengujian dengan menggunakan data sintetik. Dalam inversi MT satu dimensi, digunakan beberapa jenis model lapisan untuk menguji AG sebagaimana pada Tabel (4.1). Dalam penelitian ini, digunakan AG kode real yang memiliki kelebihan dibandingkan

AG kode biner, diantaranya handal dalam permasalahan inversi variabel kontinu dan efisiensi waktu (Haupt and Haupt, 2004).

Inversi MT satu dimensi merupakan permasalahan inversi non-linear. Penyelesaian inversi non-linear dengan pendekatan lokal sangat memerlukan informasi *a priori* berupa model awal yang cukup dekat dengan model sesungguhnya. Menurut Menke (2012), hal ini sering menimbulkan permasalahan konvergensi. Karena fungsi objektif permasalahan non-linear dapat memiliki nilai optimum lokal lebih dari satu, maka hasil inversinya rawan konvergen ke minimum lokal.

Menurut Grandis (2009) permasalahan inversi non-linear, dalam hal ini inversi MT satu dimensi, dapat diselesaikan dengan teknik pendekatan global. Salah satunya yaitu AG yang merupakan metode pencarian acak terarah.

Pada proses inversi data sintetik MT, digunakan respon model (resistivitas semu dan fasa) bebas *noise* hasil pemodelan kedepan. Respon model ini digunakan sebagai input untuk menghitung fungsi objektif (*root mean square error* antara data observasi dan perhitungan) atau *misfit* yang harus diminimumkan. Menurut Grandis (2009), meminimumkan fungsi *misfit* ini berasosiasi dengan kecocokan antara respon model hasil observasi dan perhitungan yang tinggi.

Parameter-parameter AG yang digunakan dalam proses inversi data sintetik MT satu dimensi ialah jumlah populasi 50, peluang *cross over* 0.6, peluang mutasi sebesar 0.3, dan jumlah iterasi (generasi) yaitu berjumlah 200. Proses inversi akan berhenti ketika proses telah mencapai 200 iterasi. Pemasangan individu yang terpilih sebagai orang tua berdasarkan pemasangan secara acak. Penggunaan parameter *crossover* dan mutasi didapatkan dari Haupt and Haupt (2004). Untuk parameter *crossover* Algoritma Genetik dengan kode real, dapat menggunakan metode pencampuran (*blending method*) yaitu

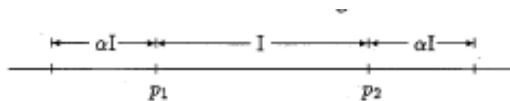
$$p_{new} = \beta p_{mn} + (1 - \beta)p_{dn} \quad (4.1)$$

dengan  $p_{new}$  merupakan nilai variabel yang dimiliki oleh keturunan,  $\beta$  merupakan bilangan random dari 0 sampai 1 yang merupakan nilai *peluang crossover*,  $p_{mn}$  merupakan besarnya variabel ibu, dan  $p_{dn}$  merupakan besarnya variabel ayah.

Berdasarkan Persamaan (4.1), pemilihan peluang *crossover* sebesar 1 akan memusnahkan variabel dari ayah yang akan diturunkan ke anaknya, begitu pula sebaliknya pemilihan peluang *crossover* sebesar 0 akan memusnahkan variabel dari ibu yang akan diturunkan kepada anaknya. Untuk peluang *crossover* sebesar 0.5, keturunannya akan memiliki rata-rata variabel dari kedua orangtuanya. Pemilihan peluang *crossover* sebesar 0.6 bertujuan membuat variabel dari ayah atau ibu yang lebih baik salah satunya akan mendominasi, sehingga keturunan yang dihasilkan akan lebih baik daripada individu di generasi sebelumnya.

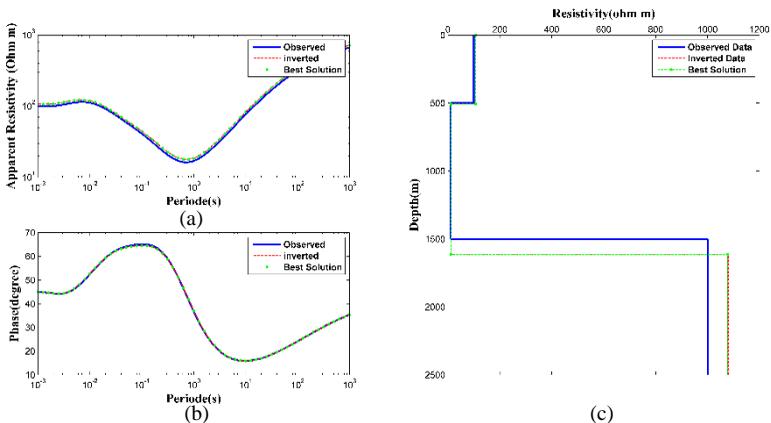
Namun, metode pencampuran yang dikembangkan oleh Radcliff (1991) diperbaiki oleh Eshelmann dan Schaffer (1993) yang dikenal sebagai *blend crossover* ( $BLX-\alpha$ ). Konsep ini menggabungkan nilai gen dari kedua orang tua dengan porsi yang sama didalam ruang yang telah dibatasi oleh kedua orangtuanya. Namun, metode ini memungkinkan memperluas pemilihan nilai gen melebihi batas ruang yang telah ditentukan. Metode ini digambarkan pada Gambar 4.7.

Pada Gambar 4.7, batas ruang untuk menentukan nilai gen kedua orangtua adalah  $I$ . Namun karena konsep ( $BLX-\alpha$ ), memungkinkan ruang penentuan nilai gen melebihi batas yang telah dibatasi orang tua ( $\alpha I$ ). Sehingga memungkinkan memiliki nilai gen yang lebih baik dibandingkan orangtuanya. Metode ini memungkinkan penggunaan nilai  $\beta$  selain 0,5.



Gambar 4.6 Metode *blend crossover* ( $BLX-\alpha$ )

Proses mutasi bertujuan menghindari AG untuk konvergen terlalu cepat. Menurut Haupt and Haupt (2004), menghindari konvergen yang cepat dapat membuat AG terhindari dari solusi optimum lokal. Dalam permasalahan inversi MT satu dimensi, hal ini diperlukan karena banyak solusi yang merupakan



Gambar 4.7 Hasil inversi model tiga lapisan (konduktif di antara resistif) dengan AG

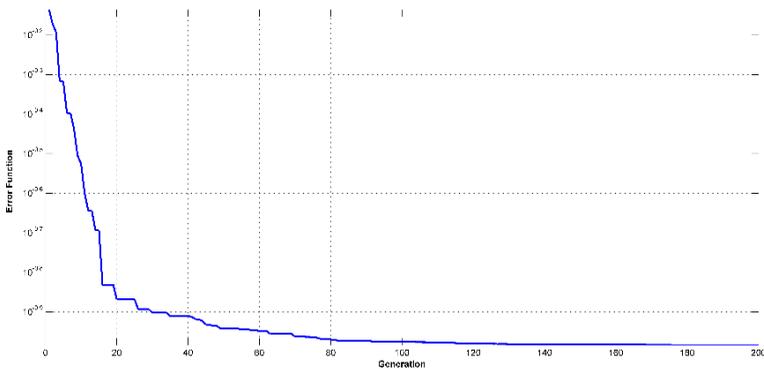
optimum lokal. Pemilihan peluang mutasi sebesar 0.1 memberikan sedikit kebebasan pada AG untuk pencarian solusi diluar ruang pencarian yang telah ditentukan, namun solusi akhirnya akan terletak pada daerah pencarian yang telah dibatasi.

Hasil inversi data sintetik MT dengan AG ditunjukkan oleh Gambar (4.7) dan (4.9). Untuk hasil inversi model lapisan konduktif di antara resistif (Gambar 4.7), dapat dilihat kecocokan antara respon model hasil observasi dengan hasil inversi yang cukup baik pada kurva fasa (Gambar 4.7b) dan kurva resistivitas semu (Gambar 4.7a) terhadap periode. Sedangkan untuk kurva resistivitas terhadap kedalaman (Gambar 4.7c) didapatkan kecocokan yang kurang baik.

Untuk model tiga lapisan, konduktif di antara resistiv, digunakan faktor pembobot ( $\lambda$ ) sebesar 0,1. Pemilihan faktor pembobot sebesar 0,1 ini karena nilai *misfit* antara data observasi

dan perhitungan yang dihasilkan untuk solusi terbaik paling kecil yaitu sebesar 0,10384. Beberapa nilai pembobot lainnya juga telah diaplikasikan, diantaranya 0,8; 0,3; dan 0,5 dengan fungsi *misfit* untuk solusi terbaik masing-masing sebesar 0,31286; 0,12756; dan 0,33978.

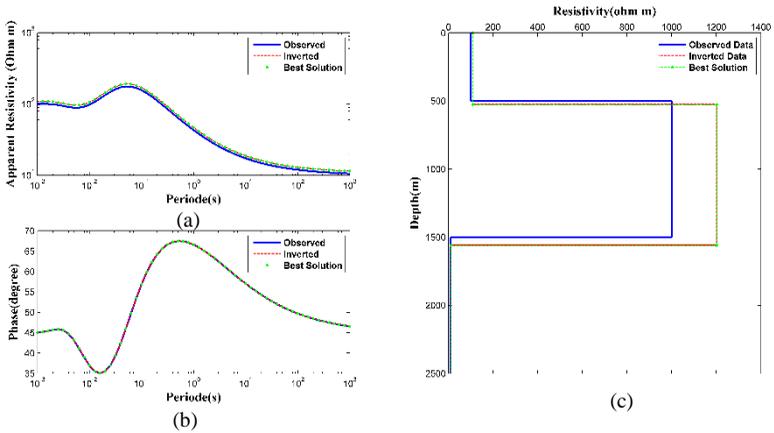
Nilai *error* untuk setiap generasi ditunjukkan oleh Gambar (4.8). Pada gambar tersebut terlihat nilai *error* yang semakin kecil seiring meningkatnya generasi. Hal ini menunjukkan dari tiap generasi, dihasilkan individu-individu yang lebih baik dari sebelumnya melalui proses seleksi, perkawinan, dan mutasi (Haupt and Haupt, 2004). Individu-individu pada setiap generasi baru memiliki lebih banyak proporsi karakteristik yang dimiliki oleh individu-individu terbaik pada generasi sebelumnya (Beasley et al., 1993). Diharapkan semakin berkurangnya nilai *error* terhadap generasi, hasil yang didapatkan dapat konvergen ke optimum global.



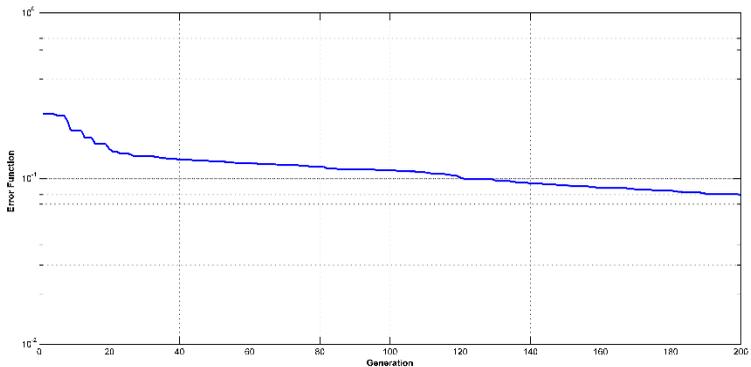
Gambar 4.8 *Error* sebagai fungsi generasi hasil inversi model bumi tiga lapis (konduktif di antara resistif)

Hasil inversi model lapisan resistif di antara konduktif (Gambar 4.9) menunjukkan kecocokan yang baik antara respon model hasil observasi dengan hasil inversi pada kurva resistivitas semu (Gambar 4.9a) dan fasa (Gambar 4.9b) terhadap periode.

Hal yang berbeda terjadi pada kurva resistivitas terhadap kedalaman (Gambar 4.9 c) dimana kecocokan respon model hasil observasi dengan hasil inversi kurang baik.



Gambar 4.9 Hasil inversi model bumi tiga lapis (resistif di antara konduktif) dengan AG

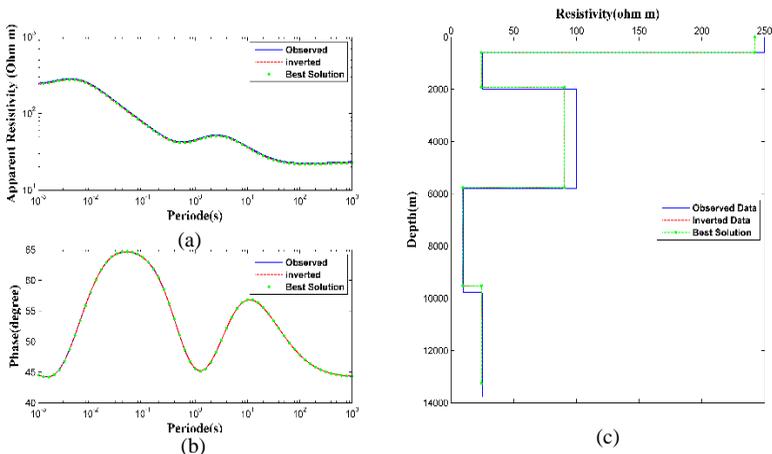


Gambar 4.10 *Error* sebagai fungsi generasi hasil inversi model bumi tiga lapis (resistif di antara konduktif)

Pembobot ( $\lambda$ ) yang digunakan untuk inversi model lapisan resistif diantara konduktif yaitu 0,3 dengan nilai *misfit* solusi

terbaiknya sebesar 0,079929. Sama seperti inversi model lapisan konduktif diantara resistive, diaplikasikan juga beberapa nilai pembobot untuk membandingkan hasil inversi yaitu 0,6; 0,7; dan 0,8 dengan nilai *misfit* masing-masing sebesar sebesar 0,3113 ;0,1775; dan 0,2881. Nilai *error* untuk tiap generasi ditunjukkan oleh Gambar (4.10). Sama seperti inversi model lapisan sebelumnya, nilai *error* semakin kecil seiring bertambahnya generasi. Sehingga diketahui semakin bertambahnya generasi, maka generasi yang dihasilkan semakin baik.

Hasil inversi model bumi lima lapis dapat ditunjukkan pada Gambar (4.11). Dari hasil inversi, dapat diamati bahwa kecocokan yang baik antara respon model hasil observasi dan hasil inversi dari ketiga kurva tersebut (Gambar 4.11 a, b, c). Pembobot ( $\lambda$ ) yang digunakan untuk inversi model bumi lima lapis ini yaitu 0,5. Sama seperti dua model bumi yang telah dibahas, pemilihan pembobot sebesar 0,5 ini berdasarkan hasil aplikasi beberapa pembobot dan dilihat pembobot mana yang memiliki hasil inversi lebih baik dengan fungsi *error* solusi terbaik yang paling kecil. Didapatkan nilai *error* untuk pembobot 0,5 sebesar 0,0361. Nilai

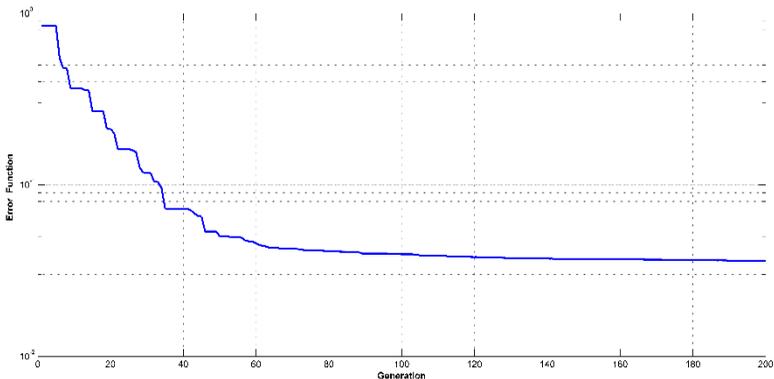


Gambar 4.11 Hasil inversi model bumi lima lapis (resistif, konduktif, resistif, konduktif, resistif) dengan AG

*error* untuk tiap generasi ditunjukkan pada Gambar (4.12). Hasil *error* yang semakin mengecil untuk setiap generasi menandakan bahwa individu yang dihasilkan pada setiap generasi semakin baik dibandingkan generasi sebelumnya.

Dari hasil inversi tiga model lapis bumi, digunakan tiga nilai pembobot yang berbeda. Menurut Grandis (2009), pemberian pembobot pada proses inversi bertujuan untuk memperhitungkan tingkat kesalahan (*error*) atau ketelitian data. Data yang memiliki kesalahan yang cukup besar akan berakibat hasil inversi yang didapatkan tidak merepresentasikan kondisi bawah permukaan sebenarnya. Dengan pemberian pembobot ini, data dengan tingkat kesalahan yang tinggi tidak akan berpengaruh pada hasil inversi yang didapatkan. Menurut Menke (2012), pembobotan termasuk suatu informasi tambahan (*a priori*) untuk menyelesaikan permasalahan inversi.

Penggunaan pembobot dalam inversi MT satu dimensi dengan AG bertujuan untuk mengurangi pengaruh fasa dalam perhitungan *misfit* karena data fasa umumnya kurang baik dan sulit untuk ditentukan (Grandis, 2009). Pembobot yang digunakan sesuai dengan permasalahan yang dihadapi. Pemilihan pembobot



Gambar 4.12 *Error* sebagai fungsi generasi hasil inversi model bumi lima lapis

harus dilakukan dengan hati-hati karena akan berdampak pada hasil inversi yang didapatkan. Seperti yang telah dilakukan dalam penelitian ini, beberapa pembobot memberikan hasil inversi yang berbeda. Oleh Karen itu, perlu dilakukan coba-coba (*trial and error*) untuk menentukan pembobot yang tepat untuk masing-masing permasalahan.

Pemilihan pembobot yang tepat merupakan salah satu kelemahan AG dalam menyelesaikan permasalahan objektif jamak. Dalam penyelesaian permasalahan inversi MT satu dimensi, AG membuat fungsi objektif jamak menjadi tunggal. AG meminimumkan fungsi objektif gabungan yaitu *root mean square* dari kuadrat logaritmik resistivitas semu dan kuadrat selisih fasa antara data observasi dengan perhitungan (Persamaan 3.1). Menurut Srinivas and Deb (1995) penyelesaian permasalahan multi-objektif dengan membuatnya menjadi objektif tunggal akan sangat sensitif pada faktor pemberat yang diberikan untuk mendapatkan solusi yang optimum.

Terdapat Beberapa peneliti yang menggunakan fungsi objektif gabungan dalam penelitiannya, yaitu Parolai et al. (2007) dan Sungkono (2011). Disamping kelemahan mengenai penggunaan pembobot yang harus sesuai, Sungkono (2011) mengungkapkan kelemahan lainnya penggunaan fungsi objektif gabungan dalam penyelesaian permasalahan multi-objektif yaitu hasil yang didapatkan rawan terjebak pada minimum lokal. Menurut Dal Moro (2010), penggunaan objektif tunggal untuk permasalahan multi objektif menurunkan performa optimasi. Penurunan performa ini membuat ketidakakuratan optimasi untuk mendapatkan solusi optimum karena permasalahan umumnya dikarakterisasi oleh beberapa minimum lokal.

Menurut Beasley et al.(1993), AG merupakan suatu teknik pencarian yang *robust*. AG tidak menjamin menemukan solusi yang merupakan solusi optimum global, namun GA menemukan solusi yang dapat diterima berdasarkan permasalahan yang dihadapi. Oleh karena itu, solusi yang didapatkan mungkin saja merupakan optimum lokal dan hal ini menyebabkan AG

rawan terjebak pada optimum lokal sebagaimana pendapat Sungkono (2011).

Dari ketiga hasil inversi data sintetik dengan GA, hasil yang diperoleh dapat dilihat kedekatannya dengan *true model*. Hasil inversi ketiga model bumi dengan menggunakan Algoritma Genetik dan *true model* dinyatakan pada Tabel (4.2)

Tabel 4.2 Hasil inversi dengan AG untuk tiga model bumi

Model Lapisan	<i>True Model</i>		<i>Inverted Model (Best Solution)</i>	
	Ketebalan (m)	Resistivitas (ohm m)	Ketebalan (m)	Resistivitas (ohm m)
Resistiv- Konduktif	500	100	507.3981 1106.182	107.1561
Resistif		10		11.4652
Resistif		1000		1077.379
Konduktif- Resistif- Konduktif	1000	100	525.9736 1034.362	108.5001 1202.395 10.81215
Resistif- Konduktif	600	250	591.4634	242.1861
Konduktif	1391	25	1331.412	24.1179
Resistif- Konduktif	3794	100	3842.347	90.3983
Konduktif- Resistif	4000	10	3747.333	9.41839 24.1826
Resistif		25		

#### 4.3 Inversi Magnetotelurik Satu Dimensi Menggunakan NSGA-II

Hasil inversi MT satu dimensi menggunakan AG yang dibahas pada sub-bab (4.2) menunjukkan hasil inversi yang mendekati *true model*. Namun dibutuhkan pembobot yang tepat di mana untuk mendapatkannya diperlukan coba-coba untuk memasukkan nilai pembobot dalam proses inversi. Karena itu, akan memakan waktu yang relatif lama untuk mendapatkan hasil yang dekat dengan model sebenarnya. Selain itu, penggunaan AG untuk penyelesaian masalah multi-objektif akan memberikan hasil yang rawan terjebak pada minimum lokal.

Menurut Deb et al. (2002), kehadiran objektif jamak dalam permasalahan optimasi memunculkan seperangkat solusi optimal yang disebut sebagai *Pareto-Optimal Solution*. Hal ini

yang membedakan permasalahan objektif jamak dengan tunggal yang hanya memiliki solusi tunggal. Pada seperangkat solusi optimal tersebut setiap titik-titik merepresentasikan nilai optimum untuk kedua fungsi objektif, yang berarti peningkatan nilai optimum salah satu fungsi objektif akan berakibat peningkatan nilai fungsi objektif yang lainnya (Fonseca et al., 1993).

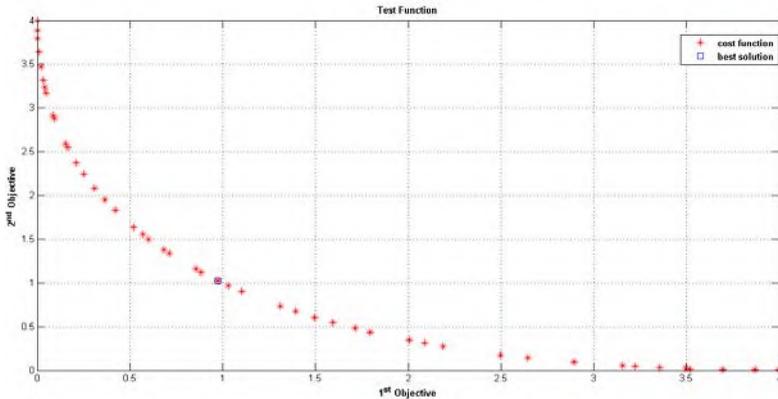
Untuk menyelesaikan permasalahan objektif jamak, beberapa peneliti mengembangkan algoritma multi-objektif evolusioner (*Multiobjective Evolutionary Algorithm*, MOEA) diantaranya Deb (1999, 2001), Fonseca et al.(1993), Horn et al.(1994), Zitzler and Thiele (1998). Kemudian Srinivas and Deb (1995) mengembangkan algoritma NSGA yang termasuk dalam MOEA. Namun adanya kritik kepada NSGA mengenai kekompleksan kompulasi dan kurang *elitme*, maka Deb et al.(2002) mengembangkan NSGA-II yang merupakan perbaikan dari NSGA.

Untuk menguji kemampuan NSGA-II dalam mengestimasi *pareto-optimal solution*, maka terlebih dahulu dilakukan suatu *test function*. *Test function* yang digunakan adalah fungsi Schaffer yang merupakan salah satu fungsi tes dalam penelitian Deb et al. (2002). Menurut Sungkono (2011), keberhasilan NSGA-II dapat diketahui dari pareto optimal yang didapatkan dari estimasi fungsi Schaffer dengan menggunakan NSGA-II yang dikembangkan oleh Deb et al. (2002). Apabila estimasi yang didapatkan lebih baik dibandingkan dengan estimasi yang dilakukan oleh Schaffer (1987), maka NSGA-II siap untuk menyelesaikan permasalahan inversi MT satu dimensi.

Dalam penelitian ini, Parameter NSGA- II yang digunakan untuk *test function* yaitu iterasi sebanyak 1000, inisiasi populasi sebanyak 50, peluang *crossover* sebesar 0,9 dan peluang mutasi sebesar  $1/n$  dengan  $n$  merupakan jumlah variabel yang diestimasi pada GA kode real. Penentuan peluang *crossover* dan mutasi ini berdasarkan Deb et al. (2002). Untuk batas ruang pencarian yaitu  $[-10^3, 10^3]$ . Fungsi objektif yang diminimumkan yaitu

$$f_1(x) = x^2 \quad (4.2a)$$

$$f_2(x) = (x - 2)^2 \quad (4.2b)$$



Gambar 4.13 Solusi non-dominasi untuk permasalahan *Test Function* NSGA-II

Dari hasil tes fungsi, didapatkan solusi terbaik yaitu  $x = 1,0513$  dengan nilai fungsi objektif pertama dan kedua berturut-turut adalah 1,0308 dan 0,9697. Ketika dilakukan perhitungan manual untuk kedua Persamaan (4.2), nilai minimum didapatkan ketika  $x = 1$ . Sehingga diketahui hasil estimasi dengan algoritma NSGA-II dapat menentukan solusi dari permasalahan multi-objektif. Sebaran solusi non-dominasi untuk permasalahan *test function* ditunjukkan oleh Gambar (4.13).

Solusi non-dominasi merupakan solusi yang tidak saling mendominasi satu sama lainnya. Menurut Zitzler (1999), hal ini yang membedakan secara jelas permasalahan multi-objektif dengan objektif tunggal. Tidak ada solusi tunggal, melainkan seperangkat solusi yang tersedia. Salah satu solusi tidak dapat dikatakan lebih baik dibandingkan solusi lainnya kecuali jika terdapat informasi tambahan yang mendukung (contohnya adalah

peringkat solusi tersebut). Solusi pareto optimal terdiri dari solusi yang optimum global.

Solusi non-dominasi didapatkan dari proses pemilihan cepat berbasis non-dominasi (Seshadri, 2006). Populasi yang diinisiasi awal dan dipilih berdasarkan non-dominasi akan menjadi *front* pertama. Pada *front* pertama sepenuhnya terdiri dari populasi awal. Kemudian pada *front* kedua didominasi oleh individu-individu yang hanya ada pada *front* pertama dimana tidak saling mendominasi. Sedangkan untuk individu yang mendominasi, tetap berada pada *front* pertama, begitu pula seterusnya. Masing-masing individu diberi peringkat berdasarkan *front* dimana mereka berada. Namun adanya suatu parameter tambahan yang membedakan NSGA-II dengan NSGA, selain pemilihan cepat berbasis non-dominas, untuk nilai *fitness* yaitu *crowding distance*. *Crowding distance* berfungsi untuk menjaga diversitas dalam populasi dengan mengukur jarak suatu individu dengan individu lainnya. Kedua konsep tersebut menjadi dasar untuk proses pemilihan individu agar tetap bertahan sebagai orangtua pada generasi berikutnya. Kedua algoritma tersebut dapat dilihat pada Persamaan (2.51) dan (2.52).

Pada Gambar (4.13), terlihat adanya suatu diskontinuitas pada solusi pareto optimal. Menurut Deb (1998), diskontinuitas ini terjadi akibat adanya kompetisi diantara solusi-solusi tersebut yang menyebabkan kepunahan beberapa sub-daerah sehingga memiliki densitas solusi lebih besar di satu daerah dibandingkan daerah lainnya. Perbedaan densitas ini merupakan suatu kecenderungan AG untuk menemukan distribusi bias dalam daerah pateto-optimal.

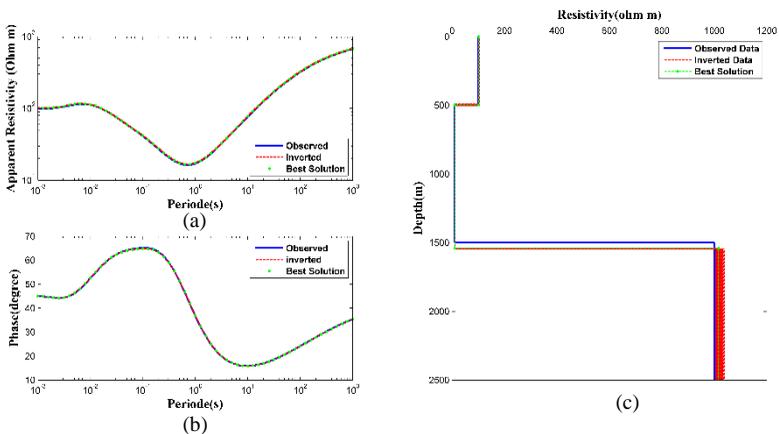
Solusi terbaik pada Gambar (4.13) ditunjukkan oleh kotak berwarna biru. Solusi terbaik yang didapatkan merupakan solusi yang dapat minimum terhadap kedua fungsi objektif tersebut. Menurut Sungkono (2011), untuk menentukan solusi yang tepat untuk memenuhi Persamaan (4.2) diatas, dicari jarak minimum dari  $f_1(x)$  dan  $f_2(x)$  terhadap nilai pareto optimum (D). Sehingga, solusi ini memiliki nilai yang minimum di fungsi objektif satu dan

dua. Secara Matematis, perumusan untuk menentukan jarak minimum terhadap pareto minimum adalah sebagai berikut

$$f_{x_i}(j) = \frac{f_i(j) - \min(f_i)}{\max(f_i) - \min(f_i)} \quad (4.3a)$$

$$D = \sqrt{f_{x_1}^2 + f_{x_2}^2} \quad (4.3b)$$

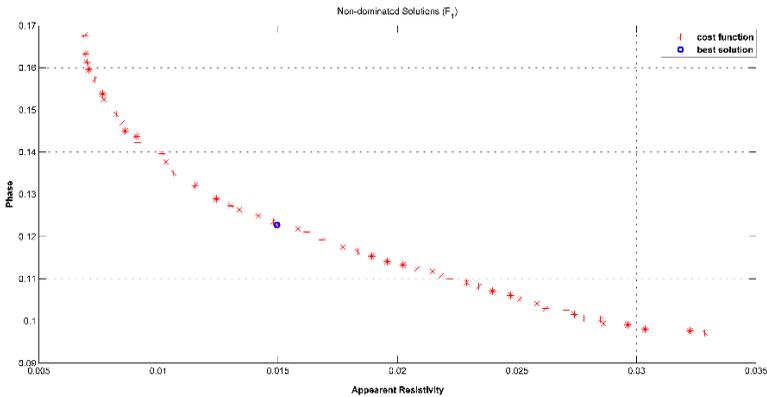
Selanjutnya NSGA-II diterapkan untuk permasalahan inversi non-linear MT satu dimensi. Parameter NSGA-II yang digunakan sama dengan yang digunakan untuk *test function*,



Gambar 4.14 Hasil inversi model tiga lapis (konduktif di antara resistif) dengan NSGA-II

namun generasi (iterasi) sebanyak 200. NSGA-II ini ditujukan untuk mengestimasi parameter ketebalan dan resistivitas tiap lapisan dengan meminimumkan dua fungsi objektif, yaitu root mean square error (*RMSE*) dari resistivitas semu dan fasa. NSGA-II diterapkan pada data sintetik (Tabel 4.1). Untuk model tiga lapis, konduktif antara resistif, didapatkan hasil inversi sebagaimana Gambar (4.13).

Pada Gambar (4.14), kecocokan respon model hasil observasi dengan hasil inversi cukup baik. Hal ini dapat terlihat dari kurva resistivitas semu dan fasa terhadap periode serta resistivitas terhadap kedalaman. Apabila dibandingkan dengan hasil inversi menggunakan AG (Gambar 4.7), maka hasil NSGA-II lebih *fit*. Berbeda dengan penyelesaian AG, NSGA-II tidak memerlukan pemilihan pembobot yang tepat dalam proses inversi untuk mendapatkan hasil yang optimum global (dalam



Gambar 4.15 Solusi non-dominasi model bumi tiga lapis, konduktif antara resistif, dengan NSGA-II

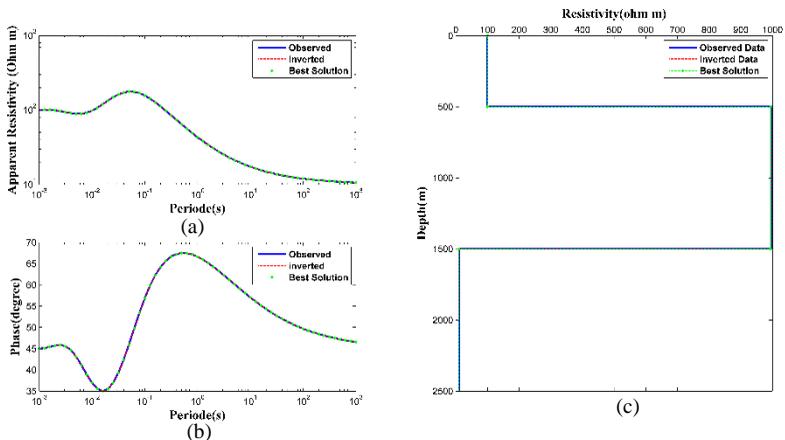
permasalahan ini, optimum global berarti nilai *misfit* yang paling rendah). Oleh karena itu, waktu yang dibutuhkan NSGA-II dalam permasalahan inversi multi-objektif lebih cepat (efisien) dan hasilnya cukup baik. Dengan satu kali *run*, NSGA-II mampu menemukan solusi-solusi yang tidak saling mendominasi dan dapat tentukan solusi yang paling *fit* dengan data observasi.

Untuk sebaran solusi non-dominasi ditunjukkan pada Gambar (4.15). Berdasarkan sebaran solusi non-dominasi, dapat dilihat NSGA-II meminimumkan dua fungsi objektif secara bersamaan, sehingga hasil yang didapatkan merupakan optimum global. Dari sekian banyak solusi tersebut, maka dapat dibuat suatu

keputusan (*decision maker*) solusi mana yang paling *fit* untuk permasalahan ini. Solusi yang paling *fit* ditentukan dengan menggunakan Persamaan (4.3).

Kotak berwarna biru pada Gambar (4.15) merupakan solusi terbaik yang paling *fit* respon modelnya untuk data perhitungan. Solusi terbaik memiliki nilai *rms* terhadap fungsi objektif resistivitas semu dan fasa secara berturut-turut yaitu 0,01497 dan 0,1228. Nilai *rms* ini cukup kecil, ditandai dengan kecocokan yang bagus pada Gambar (4.15).

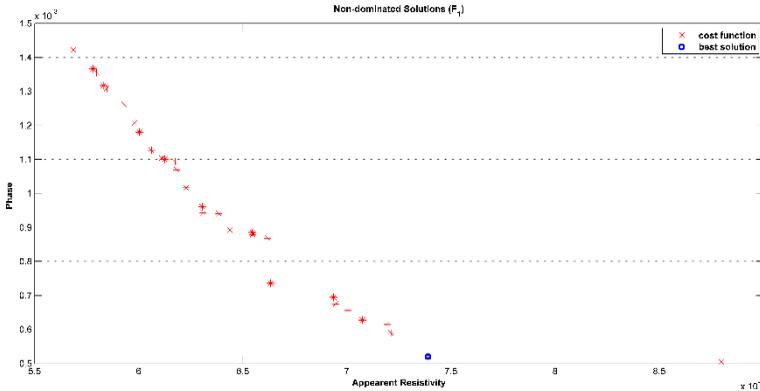
Untuk hasil inversi model bumi tiga lapis, resistif diantara konduktiv, ditunjukkan pada Gambar (4.16). Pada Gambar (4.14),



Gambar 4.16 Hasil inversi model tiga lapis (resistif di antara konduktiv) dengan NSGA-II

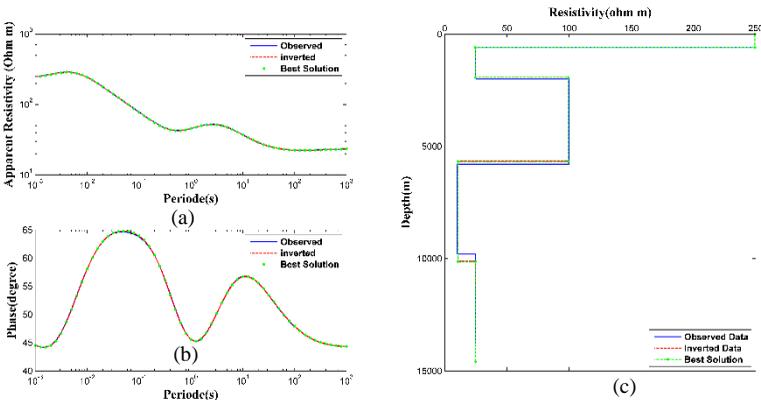
dapat dilihat kecocokan respon model hasil observasi dan inversi untuk ketiga kurva sangat baik. Kecocokan ini sebelumnya tidak ditunjukkan dari hasil inversi AG dengan model yang sama (Gambar 4.9). Hal ini disebabkan pemilihan pembobot yang masih kurang tepat untuk AG.

Sebaran solusi non-dominasi untuk inversi model bumi tiga lapis bumi, resistif di antara konduktiv, ditunjukkan pada



Gambar 4.17 Solusi non-dominasi model bumi tiga lapis, resistif antara konduktif, dengan NSGA-II

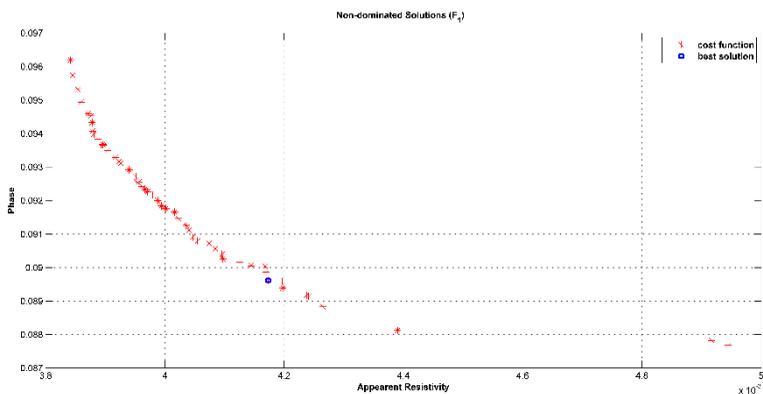
Gambar (4.17). Solusi terbaik ditunjukkan oleh kotak berwarna biru dengan nilai  $rms$  yang kecil, yaitu  $7,39 \times 10^{-4}$  untuk fungsi objektif pertama (resistivitas semu) dan  $5,198 \times 10^{-4}$  untuk fungsi objektif kedua (fasa). Apabila dibandingkan dengan AG untuk permasalahan yang sama, nilai  $rms$  NSGA-II untuk masing-masing fungsi objektif lebih kecil dibandingkan nilai  $rms$  gabungan AG (Gambar 4.9). Oleh karena itu, kecocokan data hasil NSGA-II lebih baik dibandingkan AG.



Gambar 4.18 Hasil inversi model lima lapis dengan NSGA-II

Untuk hasil inversi model lima lapis bumi, ditunjukkan pada Gambar (4.18). Kecocokan respon model hasil observasi dan inversi sangat baik. Hal ini dapat ditunjukkan dari kurva resistivitas semu dan fasa terhadap periode serta resistivitas terhadap kedalaman. Apabila kembali dibandingkan dengan hasil inversi AG untuk model bumi lima lapis (Gambar 4.10 c), dapat dilihat hasil inversi NSGA-II lebih baik. Untuk hasil inversi model bumi lima lapis ini, NSGA-II mampu mengestimasi parameter bawah permukaan tanah yang merupakan solusi optimum global.

Untuk sebaran solusi non-dominasi ditunjukkan pada Gambar (4.19).



Gambar 4.19 Solusi non-dominasi model bumi lima lapis dengan NSGA-II

Dari sebaran solusi non dominasi (Gambar 4.18), dapat diketahui solusi terbaik ditandai dengan kotak berwarna biru. Solusi terbaik memiliki nilai minimum terhadap dua fungsi objektif. Solusi terbaik memiliki nilai *rms* terhadap fungsi objektif resistivitas semu dan fasa secara berturut-turut yaitu 0,004173 dan 0,08962. Nilai *rms* yang cukup kecil untuk kedua fungsi objektif

ini menyatakan nilai yang didapatkan optimum terhadap kedua fungsi objektif. Apabila dibandingkan dengan nilai *rms* gabungan yang digunakan dalam AG, nilai *rms* hasil NSGA-II lebih kecil sehingga hasil yang diperoleh lebih baik.

Dari hasil inversi data sintetik dengan NSGA-II untuk tiga model lapis bumi, hasil yang diperoleh dan solusi terbaiknya dekat dengan *true model*. Hasil inversi ketiga model bumi dengan menggunakan Algoritma Genetik dan *true model* dinyatakan pada Tabel (4.3)

Tabel 4.3 Hasil inversi dengan NSGA-II untuk tiga model bumi

Model Lapisan	<i>True Model</i>		<i>Inverted Model (Best Solution)</i>	
	Ketebalan (m)	Resistivitas (ohm m)	Ketebalan (m)	Resistivitas (ohm m)
Resistiv-Konduktif Resistiv	500	100	497.9361	101.3569
		10	1043.9760	10.4824
		1000		1016.2374
Konduktiv-Resistiv-Konduktiv	1000	100	499.9569	100.0739
		1000	1000.6624	994.9527
		10		10.0072
Resistiv-Konduktif	600	250	603.9956	249.2697
	1391	25	1338.9792	24.4766
Resistiv-Konduktiv-Resistiv	3794	100	3726.8821	99.5242
	4000	10	4463.946524	10.6496
		25		24.9768

Bila dibandingkan hasil NSGA-II (Tabel 4.3) dan AG (Tabel 4.2), hasil model hasil inversi NSGA-II lebih dekat dengan *true model* dibandingkan dengan hasil inversi AG.

Dari hasil inversi dengan AG dan NSGA-II, dapat diamati waktu untuk masing-masing algoritma dalam mengestimasi parameter fisis bawah permukaan yang dalam kasus inversi MT satu dimensi adalah ketebalan dan resistivitas masing-masing lapisan. Waktu untuk masing-masing algoritma ditunjukkan pada Tabel (4.4).

Tabel 4.4 Waktu inversi AG dan NSGA-II

Model Lapisan	GA		NSGA-II	
	AVERAGE TIME FOR EACH ITERATION (SECOND)	TIME CONSUME (SECOND)	AVERAGE TIME FOR EACH ITERATION	TIME CONSUME (SECOND)
Resistif-Konduktif-Resistif	14.7289227	2945.78454	14.55799534	2911.599068
Konduktif-Resistif-Konduktif	17.40570759	3481.141518	17.93165591	3586.331182
Resistif-Konduktif-Resistif-Konduktif-Resistif	15.37179631	3074.359262	22.0035465	4400.7093

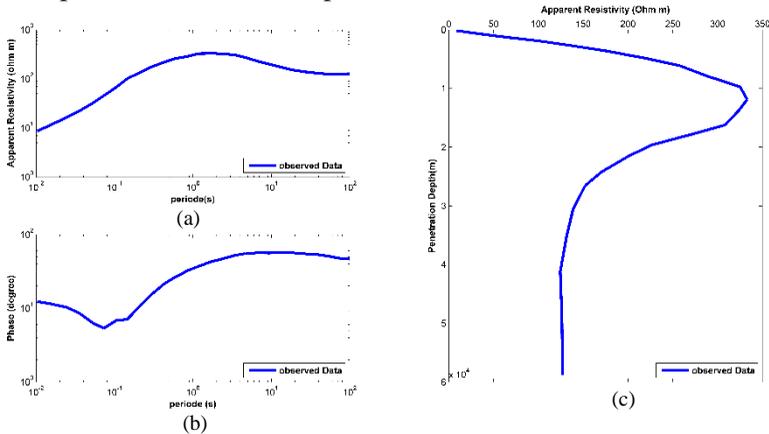
Dari Tabel (4.3), diketahui bahwa rata-rata waktu iterasi dan konsumsi waktu untuk inversi model bumi tiga lapis dengan NSGA-II dan AG tidak jauh berbeda, begitupula pada model bumi lima lapis. Namun, penggunaan pembobot yang tepat dalam AG untuk mendapatkan hasil inversi yang mendekati model sebenarnya sangat diperlukan. Oleh karena itu, mencoba-coba memasukkan nilai pembobot dengan range 0 sampai 1 membuat efisiensi waktu AG menjadi berkurang. Sehingga memakan waktu lebih lama dibandingkan NSGA-II.

#### 4.4 Inversi Data Lapisan Magnetotelurik

Pada Subbab (4.2) dan (4.3), telah dibahas mengenai inversi MT satu dimensi menggunakan data sintetik tiga model lapis bumi dengan AG dan NSGA-II. Dari kedua subbab tersebut, dapat dilihat bahwa NSGA-II dapat mengestimasi parameter fisis MT berupa resistivitas dan ketebalan masing-masing lapisan lebih baik dibandingkan AG. Oleh karena itu, untuk mengestimasi parameter fisis MT pada data sesungguhnya, digunakan algoritma NSGA-II. Pada subbab ini, NSGA-II diterapkan untuk dua data

lapangan yang diperoleh dari Sasaki (1989). Data lapangan yang digunakan dilampirkan pada Lampiran 2.

Pada proses inversi data lapangan MT satu dimensi, diperlukan penentuan ruang pencarian model terlebih dahulu. Penentuan ini sangat penting karena akan berpengaruh terhadap hasil inversi yang akan didapatkan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, untuk menentukan batas-batas ruang pencarian model pada data lapangan, digunakan konsep *penetration depth*, dari data lapangan ini sebagaimana pada Gambar (4.20). Kurva penetrasi kedalaman ini dapat membantu dalam memperkirakan jumlah dan nilai resistivitas lapisan-lapisan serta batas-batas yang akan digunakan dalam proses inversi. Selan kurva penetrasi kedalaman, dalam mengestimasi jumlah lapisan juga dapat menggunakan kurva resistivitas semu serta didukung kurva fasa terhadap periode. Dari Gambar (4.20), diduga terdapat suatu zona resistif yang merupakan anomali bawah permukaan.



Gambar 4.20 Respon model data lapangan

Dari Gambar (4.20c), dapat ditentukan *search space* untuk ketebalan dan resistivitas semu masing-masing lapisan. Terdapat model bumi tiga lapis pada data lapangan ini dengan lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Estimasi *search space*

ditunjukkan pada Tabel (4.5). Parameter NSGA-II yang digunakan sama seperti proses inversi data sintetik, yaitu iterasi sebanyak 200, inisiasi populasi sebanyak 50, peluang *crossover* sebesar 0,9 dan peluang mutasi sebesar  $1/n$  dengan  $n$  merupakan jumlah variabel yang diestimasi pada GA kode real.

Penggunaan iterasi sebanyak 200 sudah cukup untuk mendapatkan solusi optimum global dengan jumlah individu 50. Untuk setiap generasi yang terbentuk, pasti tercipta individu-individu yang lebih baik dibandingkan dengan individu – individu pada generas sebelumnya. Hal ini dikarenakan NSGA-II ini memiliki prinsip solusi yang non-dominasi dan juga seleksi berdasarkan *crowding distance*, maka individu tiap generasi akan semakin baik.

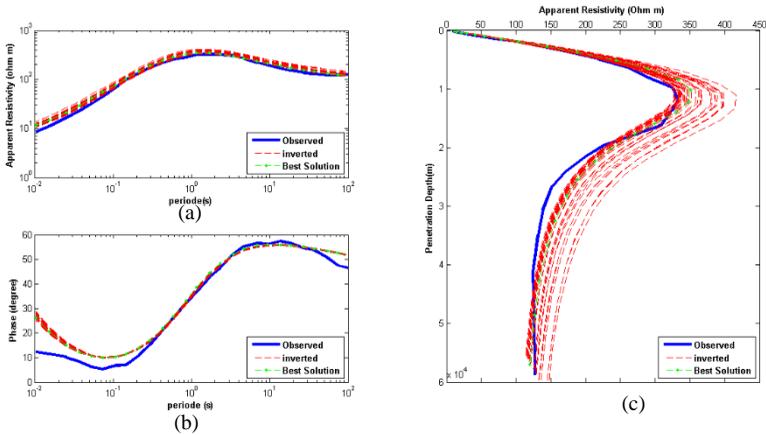
Tabel 4.5 Estimasi *search space* data lapangan

Model Lapisan	Lapisan ke-	Search Space Ketebalan		Search Space Resistivitas	
		max	min	max	min
Resistif-Konduktif Resistif	1	15000	100	400	5
	2	5000	20000	1000	100
	<i>Half Space</i>		500	100	

Hasil inversi untuk data lapangan dengan NSGA-II ditunjukkan pada Gambar 4.21. Dari Gambar (4.21), kecocokan yang baik antara respon model hasil observasi dan inversi terlihat pada kurva resistivitas terhadap periode (Gambar 4.21a). Namun, untuk kurva fasa terhadap periode dan resistivitas semu terhadap kedalaman menunjukkan kecocokan yang tidak terlalu baik. Kembali pada pernyataan Telford (2004) yaitu kurva fasa memiliki kesulitan untuk memperoleh pengukuran fasa yang pasti dan dapat

diandalkan untuk setiap keadaan. Oleh karena itu, kurva fasa hanya digunakan untuk verifikasi hasil kurva resistivitas semu.

Sebaran solusi non-dominasi ditunjukkan pada Gambar (4.22). Solusi terbaik ditunjukkan oleh kotak biru dengan nilai *rms* untuk masing-masing fungsi objektif 1 (resistivitas semu) dan 2 (fasa) yaitu 0,1384 dan 4,161. Nilai *rms* yang masih cukup besar

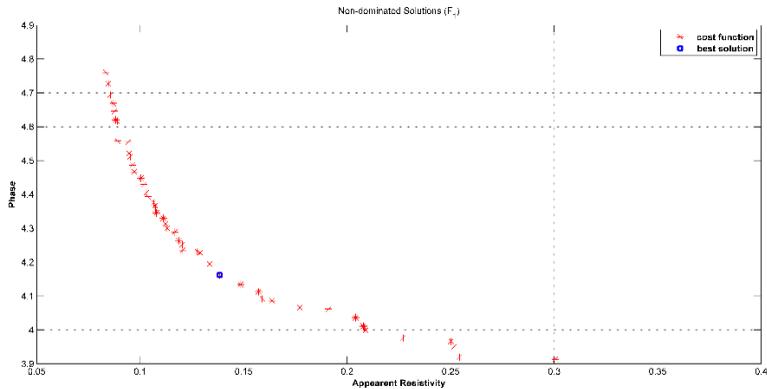


Gambar 4.21 Hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II

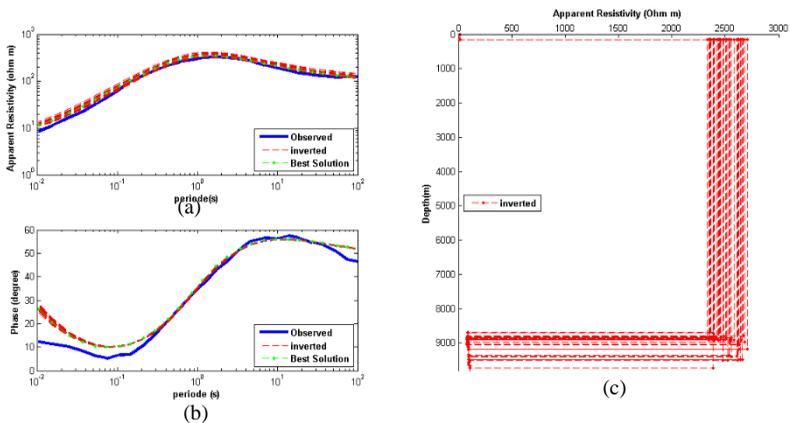
terhadap fungsi objektif 2 menyebabkan kekurangcocokkan respon model hasil observasi dan perhitungan. Parameter model terbaik yang didapatkan dari hasil inversi NSGA-II dinyatakan pada Tabel (4.6).

Tabel 4.6 Hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II

Jumlah Lapisan	Model Lapisan	Ketebalan (m)	Resistifitas (ohm m)
Tiga Lapisan	Resistif	149,9907	12,4639
	Konduktif	8625,5	2670
	Resistif		88,9706



Gambar 4.22 Solusi non-dominasi data lapangan NSGA-II



Gambar 4.23 Hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II

Jumlah lapisan yang didapatkan dapat disajikan dalam bentuk distribusi resistivitas terhadap kedalaman (Gambar 4.23). Berdasarkan hasil inversi data lapangan dengan NSGA-II, diketahui bahwa NSGA-II mampu untuk mengestimasi parameter fisis MT (ketebalan dan resistivitas lapisan) yang mendekati model

sebenarnya tanpa membutuhkan pembobot yang tepat seperti pada permasalahan AG.

## LAMPIRAN 1

### Tabel Perhitungan Waktu Inversi Untuk Algoritma Genetik dan NSGA-II

Tabel 1.1 Data perhitungan waktu inversi untuk data sintetik dengan Algoritma Genetik dan NSGA-II Model tiga lapisan, konduktif di antara Resistif

ITERASI	GA (sekon)	NSGA-II (sekon)
1	25.39232	26.67622
2	36.78062	44.73986
3	48.12447	58.6783
4	59.42685	72.23741
5	71.02874	85.74883
6	82.55876	99.6754
7	94.19191	113.8994
8	106.0425	128.0328
9	118.1324	142.0179
10	131.3201	155.8104
11	143.6249	169.9367
12	155.6569	183.7443
13	167.8204	197.5974
14	180.1714	211.5037
15	192.8215	225.8222
16	205.6543	239.7413
17	218.4745	253.6767
18	231.2778	268.1763
19	245.3494	282.8115
20	258.2873	296.689
21	271.1984	310.9032
22	284.1922	324.9065
23	297.2739	338.8462
24	310.4028	352.7926

25	323.8043	366.6397
26	336.9612	380.8012
27	350.182	394.788
28	363.3153	409.197
29	377.4102	423.3998
30	390.4608	437.3079
31	403.5296	451.1111
32	416.6888	465.1613
33	429.8841	479.0965
34	443.414	493.112
35	457.127	507.3085
36	470.6587	521.3592
37	484.2589	535.5124
38	498.9789	549.4857
39	512.6481	563.4876
40	526.3859	577.526
41	540.1079	591.4826
42	554.143	605.4855
43	570.6723	619.7381
44	584.9916	634.0726
45	599.2481	648.1735
46	614.5196	662.8917
47	628.9662	677.132
48	643.3718	691.2031
49	657.7898	705.1153
50	672.5733	719.0984
51	687.0992	733.1442
52	701.4513	747.3535
53	716.0911	761.4608
54	732.0858	775.9025
55	746.9339	789.9536
56	761.481	804.0338
57	776.0673	818.1818
58	790.8555	832.5228

59	805.734	846.6302
60	820.4584	860.8427
61	835.0456	874.8275
62	851.0307	888.9837
63	865.6603	903.4281
64	880.5269	917.5348
65	895.4339	931.7141
66	910.0617	945.9375
67	924.5744	960.2352
68	939.0801	974.5623
69	953.5729	988.7806
70	968.4009	1003.261
71	984.0109	1018.237
72	998.8886	1033.368
73	1013.353	1047.47
74	1027.853	1062.917
75	1042.344	1077.225
76	1056.878	1091.657
77	1071.426	1105.994
78	1086.043	1120.333
79	1102.118	1134.684
80	1116.822	1149.581
81	1131.493	1163.922
82	1146.31	1178.267
83	1161.312	1192.681
84	1176.138	1206.97
85	1190.782	1221.41
86	1205.681	1236.186
87	1221.902	1250.592
88	1236.667	1265.433
89	1251.289	1279.666
90	1265.848	1294.025
91	1280.466	1308.328
92	1295.079	1323.05

93	1309.614	1337.384
94	1324.509	1351.97
95	1340.358	1366.435
96	1355.523	1380.976
97	1370.145	1396.042
98	1385.086	1410.694
99	1400.069	1425.322
100	1414.902	1439.972
101	1429.799	1454.511
102	1444.44	1468.963
103	1460.254	1483.355
104	1475.293	1497.696
105	1489.979	1512.111
106	1504.901	1526.942
107	1519.926	1541.902
108	1534.677	1556.726
109	1549.528	1571.142
110	1564.294	1585.554
111	1580.236	1600.628
112	1595.164	1615.108
113	1610.097	1629.421
114	1624.924	1644.296
115	1639.709	1658.663
116	1654.574	1673.207
117	1669.217	1687.661
118	1683.952	1702.029
119	1699.678	1716.483
120	1714.682	1731.132
121	1729.525	1746.511
122	1744.3	1761.338
123	1759.033	1776.192
124	1773.767	1790.751
125	1788.679	1805.4
126	1803.481	1819.85

127	1819.358	1834.409
128	1834.232	1848.874
129	1849.114	1863.496
130	1863.94	1878.015
131	1879.116	1892.856
132	1894.086	1907.518
133	1909.365	1921.939
134	1924.018	1936.338
135	1939.698	1951.619
136	1954.379	1966.48
137	1969.192	1981.369
138	1984	1995.96
139	1998.724	2011.215
140	2013.46	2026.235
141	2028.349	2040.925
142	2042.851	2055.641
143	2057.423	2070.547
144	2073.472	2085.319
145	2088.283	2100.606
146	2102.857	2115.186
147	2117.606	2130.673
148	2132.398	2145.922
149	2147.118	2160.691
150	2161.476	2175.353
151	2175.846	2190.261
152	2191.468	2204.954
153	2205.933	2219.818
154	2220.306	2234.495
155	2234.735	2249.637
156	2249.299	2264.438
157	2264.178	2278.963
158	2279.207	2293.911
159	2294.168	2308.677
160	2310.142	2323.303

161	2325.056	2337.918
162	2339.914	2352.835
163	2354.78	2367.995
164	2370.286	2383.473
165	2385.112	2398.062
166	2400.47	2412.208
167	2416.17	2426.594
168	2432.745	2442.252
169	2447.83	2458.675
170	2462.917	2473.518
171	2479.093	2488.327
172	2495.82	2503.591
173	2512.066	2518.32
174	2528.491	2533.026
175	2546.074	2547.731
176	2562.211	2562.376
177	2578.513	2577.324
178	2595.124	2592.798
179	2612.048	2607.361
180	2628.38	2621.89
181	2644.523	2636.67
182	2660.733	2651.197
183	2678.436	2665.707
184	2694.782	2680.311
185	2711.14	2695.216
186	2727.743	2709.54
187	2744.774	2723.918
188	2761.369	2738.275
189	2776.829	2752.874
190	2793.218	2767.228
191	2808.384	2781.583
192	2823.71	2796.02
193	2839.11	2810.387
194	2854.204	2824.741

195	2869.48	2839.111
196	2884.455	2853.521
197	2899.389	2867.993
198	2915.533	2882.698
199	2930.553	2897.196
200	2945.785	2911.599
AVERAGE TIME FOR EACH ITERATION	14.7289227	114.2043
CONSUME TIME	2945.785	2911.599

Tabel 1.2 Data perhitungan waktu inversi untuk data sintetik dengan Algoritma Genetik dan NSGA-II model tiga lapisan, resistif di antara konduktif

ITERASI	AG (sekon)	NSGA-II (sekon)
1	31.384656	26.67622
2	45.777678	44.73986
3	59.901306	58.6783
4	73.960183	72.23741
5	88.340042	85.74883
6	102.621621	99.6754
7	116.981288	113.8994
8	132.653734	128.0328
9	147.200402	142.0179
10	161.702574	155.8104
11	176.195989	169.9367
12	190.822168	183.7443
13	205.677658	197.5974
14	220.696403	211.5037
15	235.492895	225.8222
16	251.429831	239.7413
17	266.306467	253.6767
18	281.251476	268.1763

19	296.200611	282.8115
20	311.440282	296.689
21	326.880132	310.9032
22	342.095307	324.9065
23	357.277429	338.8462
24	373.965892	352.7926
25	389.382849	366.6397
26	404.753352	380.8012
27	420.107089	394.788
28	435.635648	409.197
29	451.130346	423.3998
30	466.686174	437.3079
31	482.281575	451.1111
32	498.886019	465.1613
33	514.666031	479.0965
34	530.416224	493.112
35	546.152623	507.3085
36	562.276838	521.3592
37	578.458788	535.5124
38	594.510707	549.4857
39	611.951762	563.4876
40	628.788235	577.526
41	645.395329	591.4826
42	661.867966	605.4855
43	678.835108	619.7381
44	695.525746	634.0726
45	712.053401	648.1735
46	729.85892	662.8917
47	746.778626	677.132
48	764.015923	691.2031
49	781.037588	705.1153
50	798.076082	719.0984
51	815.222417	733.1442
52	832.408212	747.3535

53	850.891397	761.4608
54	868.472654	775.9025
55	886.004918	789.9536
56	903.21432	804.0338
57	920.420078	818.1818
58	937.399546	832.5228
59	954.446339	846.6302
60	973.134108	860.8427
61	990.686339	874.8275
62	1007.966558	888.9837
63	1025.372603	903.4281
64	1042.771184	917.5348
65	1060.152649	931.7141
66	1077.687292	945.9375
67	1096.299204	960.2352
68	1113.954234	974.5623
69	1131.525764	988.7806
70	1149.042998	1003.261
71	1166.660122	1018.237
72	1184.299146	1033.368
73	1201.772178	1047.47
74	1220.232394	1062.917
75	1238.262893	1077.225
76	1256.858592	1091.657
77	1274.604018	1105.994
78	1291.87575	1120.333
79	1309.429195	1134.684
80	1327.239112	1149.581
81	1346.228139	1163.922
82	1363.813778	1178.267
83	1381.212179	1192.681
84	1399.147354	1206.97
85	1416.947604	1221.41
86	1434.400763	1236.186

87	1451.672964	1250.592
88	1469.979406	1265.433
89	1487.43687	1279.666
90	1505.054962	1294.025
91	1522.638719	1308.328
92	1540.042464	1323.05
93	1557.535891	1337.384
94	1576.449419	1351.97
95	1594.075327	1366.435
96	1611.660399	1380.976
97	1629.233285	1396.042
98	1646.922783	1410.694
99	1664.378677	1425.322
100	1681.818991	1439.972
101	1699.901253	1454.511
102	1717.061137	1468.963
103	1734.268759	1483.355
104	1751.506929	1497.696
105	1768.582323	1512.111
106	1785.85179	1526.942
107	1802.852817	1541.902
108	1820.959659	1556.726
109	1838.31964	1571.142
110	1855.816923	1585.554
111	1873.440694	1600.628
112	1890.788286	1615.108
113	1907.80033	1629.421
114	1924.91085	1644.296
115	1943.191716	1658.663
116	1960.274687	1673.207
117	1977.473598	1687.661
118	1994.610945	1702.029
119	2012.06053	1716.483
120	2029.54242	1731.132

121	2047.467526	1746.511
122	2068.729571	1761.338
123	2087.504733	1776.192
124	2107.240627	1790.751
125	2125.992009	1805.4
126	2145.573632	1819.85
127	2163.124581	1834.409
128	2181.52314	1848.874
129	2199.420052	1863.496
130	2216.81728	1878.015
131	2234.562849	1892.856
132	2252.012447	1907.518
133	2269.438278	1921.939
134	2286.995419	1936.338
135	2305.654295	1951.619
136	2322.933669	1966.48
137	2340.09439	1981.369
138	2357.462983	1995.96
139	2375.035943	2011.215
140	2392.701303	2026.235
141	2410.279047	2040.925
142	2429.064063	2055.641
143	2446.490003	2070.547
144	2464.082431	2085.319
145	2481.405505	2100.606
146	2498.879885	2115.186
147	2516.649475	2130.673
148	2534.308767	2145.922
149	2552.84379	2160.691
150	2570.243275	2175.353
151	2587.551456	2190.261
152	2605.026463	2204.954
153	2622.766672	2219.818
154	2640.248757	2234.495

155	2657.595511	2249.637
156	2676.277956	2264.438
157	2694.430521	2278.963
158	2712.591559	2293.911
159	2730.405599	2308.677
160	2748.576065	2323.303
161	2766.665469	2337.918
162	2784.764868	2352.835
163	2803.515093	2367.995
164	2821.789098	2383.473
165	2839.654887	2398.062
166	2857.471773	2412.208
167	2876.347788	2426.594
168	2893.888781	2442.252
169	2913.009363	2458.675
170	2930.976594	2473.518
171	2950.334562	2488.327
172	2968.397133	2503.591
173	2986.68252	2518.32
174	3004.757406	2533.026
175	3023.259116	2547.731
176	3041.992293	2562.376
177	3060.317262	2577.324
178	3080.454691	2592.798
179	3099.536146	2607.361
180	3117.651575	2621.89
181	3135.511447	2636.67
182	3154.853362	2651.197
183	3172.492937	2665.707
184	3190.25381	2680.311
185	3207.926652	2695.216
186	3225.933067	2709.54
187	3244.097234	2723.918
188	3262.708177	2738.275

189	3281.687783	2752.874
190	3299.715468	2767.228
191	3317.79717	2781.583
192	3336.174988	2796.02
193	3354.411031	2810.387
194	3372.688127	2824.741
195	3390.816138	2839.111
196	3409.864164	2853.521
197	3427.676907	2867.993
198	3445.509363	2882.698
199	3463.526581	2897.196
200	3481.141518	2911.599
AVERAGE TIME FOR EACH ITERATION	17.40571	14.558
CONSUME TIME	3481.141518	2911.599

Tabel 1.3 Data perhitungan waktu inversi untuk data sintetik dengan Algoritma Genetik dan NSGA-II model lima lapisan, resistif-konduktif-resistif-konduktif-resistif

ITERASI	AG (sekon)	NSGA-II (sekon)
1	25.837346	35.853718
2	38.621135	53.905133
3	52.209299	72.104405
4	64.758895	90.260102
5	77.520022	108.75927
6	89.932742	127.184355
7	103.490277	146.905847
8	117.388735	166.028346
9	130.264443	184.476843
10	143.226483	204.936488
11	156.599941	223.42575

12	170.517477	243.239935
13	183.375537	263.785439
14	196.407427	283.562256
15	209.594387	303.40433
16	222.726459	323.743461
17	235.969295	344.331026
18	249.24862	364.806991
19	262.571662	386.824935
20	276.070879	407.639481
21	290.590608	428.877088
22	304.17722	451.199097
23	317.773259	473.260309
24	331.475853	496.598169
25	345.244227	519.255381
26	359.013204	542.568559
27	372.931304	565.840846
28	386.853514	589.414379
29	400.878083	613.965035
30	416.084573	639.198063
31	430.171937	663.627243
32	444.125461	688.400376
33	458.134579	713.605882
34	472.194434	739.580079
35	486.387672	764.638333
36	500.589369	789.968068
37	514.790024	815.107042
38	530.05511	840.778983
39	544.339441	867.942031
40	558.765668	893.789474
41	573.198894	918.487654
42	587.689464	943.268741
43	602.236418	966.608637
44	616.825358	991.643571
45	631.651614	1015.628025

46	646.552932	1039.250272
47	662.665676	1063.161275
48	677.683889	1087.438952
49	692.72573	1112.002963
50	707.720397	1135.551673
51	722.833264	1158.915618
52	737.99504	1182.808258
53	753.161892	1206.72427
54	769.487409	1231.81283
55	784.570346	1256.888694
56	799.869757	1282.684406
57	815.184757	1309.272677
58	830.662677	1335.927986
59	846.124724	1363.959281
60	861.563397	1391.689451
61	876.988452	1418.45151
62	893.430584	1445.684167
63	908.847776	1474.129607
64	924.163246	1502.161253
65	939.843955	1530.231632
66	954.85164	1557.502202
67	969.786812	1584.483119
68	984.81061	1610.732722
69	1000.168182	1637.822019
70	1016.218038	1664.701051
71	1031.239537	1691.636691
72	1046.416941	1719.175927
73	1061.408841	1745.965342
74	1076.555613	1772.455762
75	1091.648849	1798.979593
76	1106.709369	1827.009028
77	1121.799903	1856.123366
78	1138.093025	1886.347522
79	1153.459542	1916.851914

80	1168.944532	1948.616344
81	1184.429671	1979.716442
82	1199.861063	2007.371836
83	1215.300871	2031.086098
84	1230.691371	2055.138896
85	1246.286769	2079.994941
86	1262.758714	2104.432873
87	1278.044205	2129.464399
88	1293.350381	2155.413674
89	1308.730885	2179.402149
90	1324.088409	2204.188562
91	1339.522792	2226.911563
92	1354.765878	2245.955477
93	1370.075732	2267.990133
94	1386.510424	2289.732447
95	1401.809842	2311.5602
96	1417.219306	2330.3943
97	1432.489838	2349.5487
98	1447.804513	2368.9166
99	1462.988695	2388.1336
100	1478.10305	2407.646
101	1493.540909	2426.4665
102	1509.709696	2446.4564
103	1524.804092	2465.5772
104	1540.218625	2484.6976
105	1555.386134	2503.8308
106	1570.562783	2522.6833
107	1585.846193	2542.2339
108	1600.945004	2561.9738
109	1617.113647	2584.0219
110	1632.382297	2603.505
111	1647.641848	2622.3325
112	1662.781957	2640.9866
113	1677.855136	2659.5637

114	1693.118919	2679.3818
115	1708.46559	2698.0129
116	1724.759781	2716.595
117	1755.17732	2735.5703
118	1770.392696	2754.3541
119	1785.607246	2773.4449
120	1800.840321	2793.263
121	1816.252118	2811.9511
122	1832.346451	2830.9368
123	1848.236893	2851.4959
124	1864.836793	2871.5704
125	1880.141799	2890.4926
126	1895.522786	2909.1706
127	1910.924347	2928.9647
128	1926.277132	2947.7894
129	1941.474022	2967.3497
130	1956.685514	2990.943
131	1972.145631	3010.6595
132	1988.429433	3029.6584
133	2003.701838	3049.9563
134	2018.96748	3068.8767
135	2034.124402	3087.7566
136	2049.338852	3106.5427
137	2064.554854	3125.6757
138	2079.946654	3144.6026
139	2095.319122	3164.8114
140	2111.661809	3183.7557
141	2127.143137	3202.6369
142	2142.912268	3221.8245
143	2158.645165	3240.7824
144	2173.910948	3259.6972
145	2189.507285	3279.8334
146	2205.662007	3298.7172
147	2222.391868	3317.7328

148	2238.092483	3337.2538
149	2254.069488	3357.2354
150	2270.019864	3376.5246
151	2285.343073	3395.5644
152	2300.698312	3415.6741
153	2316.077504	3434.5136
154	2332.634021	3453.4735
155	2349.891961	3472.3886
156	2365.396251	3491.3993
157	2380.970313	3510.3233
158	2396.577707	3530.9065
159	2412.289694	3550.7358
160	2436.478051	3569.7502
161	2452.333776	3588.669
162	2469.743449	3607.7245
163	2486.01734	3626.725
164	2502.050359	3646.8103
165	2517.735757	3665.792
166	2534.170796	3684.9161
167	2550.168871	3703.7748
168	2567.800808	3722.7166
169	2584.853492	3741.9898
170	2600.549637	3762.3399
171	2616.38876	3781.5098
172	2632.537942	3800.5967
173	2648.231058	3819.8909
174	2663.792228	3839.4763
175	2679.289142	3858.6323
176	2694.853442	3878.8018
177	2712.174609	3899.2456
178	2727.797336	3918.5039
179	2743.862362	3937.8452
180	2759.813885	3958.8319
181	2775.327137	3979.7242

182	2790.942421	4001.3848
183	2806.51794	4024.0604
184	2822.043586	4045.5389
185	2838.510207	4067.6873
186	2854.060776	4089.9802
187	2869.656329	4110.1635
188	2885.216392	4131.7544
189	2900.919337	4153.2148
190	2916.389091	4174.5526
191	2931.874433	4196.3315
192	2949.073414	4218.1772
193	2965.290186	4240.1504
194	2980.646358	4263.0745
195	2996.196982	4285.2701
196	3011.56244	4307.736
197	3026.758453	4330.7979
198	3042.090215	4353.6749
199	3057.360476	4377.7462
200	3074.359262	4400.7093
AVERAGE TIME FOR EACH ITERATION	15.3718	22.00355
CONSUME TIME	3074.359262	4400.7093

## LAMPIRAN 2

### Data Lapangan Magnetotelurik- (Sasaki, 1989)

**Tabel 2.1** Data Lapangan Magnetotellurik Pada Stasiun 1

<i>Frequency (Hz)</i>	<i>Apparent Resistivity (Ohm.m)</i>	<i>Phase (degree)</i>
0.0092	127.13	46.29
0.0134	126.16	47.55
0.0183	124.36	50.78
0.0269	131.72	53.84
0.037	138.68	54.79
0.054	152.18	56.64
0.073	170.81	57.5
0.107	199.75	56.3
0.146	225.81	56.68
0.215	271.92	55.35
0.293	308.42	52.17
0.43	323.88	46.61
0.59	332.97	42.88
0.86	325.09	36.88
1.17	286.98	32.44
1.72	257.72	26.17
2.34	218.75	21.38
3.4	174.67	15.34
4.7	136.12	10.92
6.9	100.92	7.05
9.4	68.78	6.89
13.7	45.56	5.36
18.8	32.49	6.29
27.5	22.73	8.43
40	16.79	10.25
66	11.43	11.51

97	8.7	12.31
----	-----	-------

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa data dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada inversi MT satu dimensi, AG objektif tunggal memerlukan fungsi pembobot yang sesuai untuk RMSE fasa dan resistivitas semu untuk menghasilkan model bawah permukaan yang sesuai dengan litologi setempat. Sedangkan NSGA-II tidak memerlukan pembobot tersebut.
2. NSGA-II telah berhasil dalam proses inversi MT 1 dimensi untuk data sintetik dan lapangan (ketebalan dan resistivitas lapisan) dengan hasil yang sesuai dengan litologi setempat.
3. Waktu yang dibutuhkan dalam proses inversi dengan NSGA-II lebih besar dibandingkan AG objektif tunggal. Namun dalam proses pencarian pembobot yang sesuai untuk RMSE resistivitas semu dan fasa, AG memerlukan waktu yang lebih besar dibandingkan NSGA-II yang tidak memerlukan pembobot.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian ini, terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya, sebagaimana berikut:

1. Aplikasi algoritma NSGA-II untuk inversi data MT 2D/ MT 3D
2. Menambahkan kendala *smoothing* pada model resistivitas inversi data MT 1D menggunakan algoritma NSGA-II

3. Metode multi-objektif lainnya (misalkan MOED dan AMALGAM) perlu dicoba untuk proses inversi data MT.

## DAFTAR PUSTAKA

- Beasley, D., Martin, R.R., Bull, D.R., 1993. An overview of genetic algorithms: Part 1. Fundamentals. Univ. Comput. 15, 58–58.
- Berdichevskii, M.N., Dmitriev, V.I., 2008. Models and methods of magnetotellurics. Springer, New York.
- C. M. Fonseca and P. J. Fleming, “Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization,” in Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, S. Forrest, Ed. San Mateo, CA: Morgan Kauffman, 1993, pp. 416–423.
- Chave, A.D., Jones, A.G. (Eds.), 2012. The magnetotelluric method: theory and practice. Cambridge University Press, New York.
- Dal Moro, G.(2010), “Insights on Surface wave dispersion and HVSR: joint analysis via Pareto optimality”, Journal of Applied Geophysics, vol.72, hal.129–140
- Deb,K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.(2002), “A Fast Elitist Multi- objective Genetic Algorithm: NSGA-II”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, hal.182-197, April 2002.
- Dal Moro, G.(2010), “Insights on Surface wave dispersion and HVSR: joint analysis via Pareto optimality”, Journal of Applied Geophysics, vol.72, hal.129–140
- Eshelman, L. J., and D. J. Shaffer. 1993. Real-coded genetic algorithms and intervalschemata.In D. L.Whitley (ed.),

Foundations of Genetic Algorithms 2. San Mateo, CA: Morgan Kaufman, pp. 187–202.

- E. Zitzler and L. Thiele, “Multiobjective optimization using evolutionary algorithms—A comparative case study,” in *Parallel Problem Solving From Nature, V*, A. E. Eiben, T. Bäck, M. Schoenauer, and H.-P. Schwefel, Eds. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998, pp. 292–301.
- E. Zitzler, K. Deb, and L. Thiele, “Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results,” *Evol. Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 173–195, Summer 2000.
- Grandis, H., 2009. *Pengantar Pemodelan Geofisika*. Jakarta: HAGI
- Griffiths, D. J. 1999. *Introduction to Electrodynamics Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall
- Haupt, R.L., Haupt, S.E. (1998), *Practical genetic algorithms*, 2nd edition, A Wiley-Interscience publication
- Helmuth, T., Spiteri, R., Szmigielski, J., n.d. *One-Dimensional Magnetotelluric Inversion with Radiation Boundary Conditions*.
- J. D. Schaffer, “Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms,” in *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, J. J. Grefenstette, Ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1987, pp. 93–100.
- J. Horn, N. Nafploitis, and D. E. Goldberg, “A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization,” in *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary*

- Computation, Z. Michalewicz, Ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994, pp. 82–87.
- K. Deb, *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Chichester, U.K.: Wiley, 2001.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. *An introduction to geophysical exploration*, 3rd ed. ed. Blackwell Science, Malden, MA.
- Menke, W. (1989), *Geophysical Data Analysis - Discrete Inverse Theory*, Academic Press, New York.
- N. Srinivas and K. Deb, “Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms,” *Evol. Comput.*, vol. 2, no. 3, pp. 221–248, Fall 1995.
- Naidu, G.D., 2012. *Magnetotellurics: Basic Theoretical Concepts*, in: *Deep Crustal Structure of the Son-Narmada-Tapti Lineament, Central India*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 13–35.
- Parolai, S., Mucciarelli, M., Gallipoli, R., Richwalski, S. M., and Strollo, A. (2007), “Comparison of empirical and numerical site responses at the tito test site, Southern Italy”, *BSSA*, vol. 97, no.5, hal. 1413-1431. Doi:10.1785/0120060223
- Radcliff, N. J. 1991. *Forma analysis and random respectful recombination*. In *Proc. 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms*, San Mateo, CA: Morgan Kauffman
- Seshadri, A., 2006. *A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. *MATLAB Cent.* 182.

- Simpson, F., Bahr, K., 2005. Practical magnetotellurics. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.
- Sungkono, 2011. Inversi Terpisah dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh dan HVSr Menggunakan Algoritma Genetik (Master Thesis), Intitutu Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- Telford, M.W., et al, 1976, Applied Geophysic, Cambridge University Press.
- Unsworth, M., 2007. Magnetotellurics, in: Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer, pp. 670–673.

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap **Irwansyah Ramadhani**, merupakan anak ke 3 dari 3 bersaudara yang lahir di Jakarta, 4 Maret 1994. Penulis telah menempuh pendidikan yang di mulai dari taman kanak-kanak (TK) Melati, SDN Pegadungan 01 Pagi Jakarta Barat, SMPN 186 Jakarta Barat, SMAN 84 Jakarta Barat, dan program S1 jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya dengan bidang studi yang di tekuni adalah Geofisika.

Selama menempuh pendidikan, penulis juga aktif dalam beberapa organisasi siswa dan mahasiswa yaitu pengurus rohani islam (Rohis) SMPN 186 Jakarta Barat periode 2008-2009, pengurus rohani islam (Rohis) SMAN 84 Jakarta Barat periode 2011-2012, Staff Dagri BEM FMIPA ITS periode 2013-2014, Staff Forum Studi Islam Fisika (Fosif) ITS periode 2013-2014, dan Staf AAPG Fisika ITS periode 2015. Beberapa prestasi yang di dapatkan penulis selama menempuh pendidikan adalah OSN-Fisika SMA tingkat Kota tahun 2011, Juara II Tim Kompetisi Debat Bahasa Inggris tingkat SMA di Universitas Negeri Jakarta (UNJ) tahun 2011, dan Program Kreatifitas Mahasiswa Bidang Penelitian (PKM-P) terdanai tahun 2016.

Tugas akhir yang di susun penulis dengan judul “**Inversi Magnetotellurik Satu Dimensi Menggunakan Algoritma Genetik Dan NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II)**” ini di harapkan akan menjadi salah satu refrensi untuk teman-teman dalam tugas akhir dengan topik yang sama namun metode inversi yang berbeda maupun dengan topik lebih lanjut (inversi *Magnetotelluric* 2 dimensi dan 3 dimensi).