



**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**INVERSI DATA MAGNETOTELLURIK 1 DIMENSI  
MENGUNAKAN ALGORITMA MULTI-OBJEKTIF  
*DRAGONFLY***

Pramudiana  
NRP 1112 100 058

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 141501**

**1D MAGNETOTELLURICS DATA INVERSION USING  
MULTI-OBJECTIF DRAGONFLY ALGORITHM**

Pramudiana  
NRP 1112 100 058

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

Department of Physics  
Faculty of Mathematics and Natural Sciences  
Institute of Technology Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

**INVERSI DATA MAGNETOTELLURIK 1 DIMENSI  
MENGUNAKAN ALGORITMA MULTI-OBJEKTIF  
DRAGONFLY**

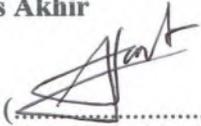
**TUGAS AKHIR**

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

Oleh:  
**PRAMUDIANA**  
**NRP. 1112 100 058**

**Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir**

**Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU**

  
(.....)

**Sungkono, M.Si.**

  
(.....)



# INVERSI DATA MAGNETOTELLURIK 1 DIMENSI MENGUNAKAN ALGORITMA MULTI – OBJEKTIVE *DRAGONFLY*

**Nama** : Pramudiana  
**NRP** : 1112100058  
**Jurusan** : Fisika FMIPA-ITS  
**Pembimbing** : Prof. Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa,  
S.U  
Sungkono, M.Si

## **Abstrak**

*Metode Magnetotellurik (MT) dapat digunakan untuk mencitrakan resistivitas bawah permukaan yang dalam. Resistivitas bawah permukaan ini didapat melalui proses inversi data MT. Pada penelitian ini, inversi data MT untuk menghasilkan resistivitas 1D menggunakan algoritma Multiobjektif Dragonfly untuk meminimumkan error antara data resistivitas semu dan fase perhitungan dengan data pengukuran. Algoritma ini telah diuji pada data sintetik dan data lapangan. Hasilnya ialah algoritma multiobjektif dragonfly dapat digunakan untuk menentukan resistivitas bawah permukaan dengan akurat dan sesuai kondisi litologi bawah permukaan.*

**Kata kunci:** *Magnetotellurik, resistivitas semu, fase, Resistivitas 1D, multiobjektif dragonfly*

# 1 DIMENSION MAGNETOTELLURIK DATA INVERSION USING MULTI-OBJECTIVE DRAGONFLY ALGORITHM

*Name* : *Pramudiana*  
*Student Identity Number* : *1112100058*  
*Mayor* : *Fisika FMIPA-ITS*  
*Advisor* : *Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya.  
Santosa., S.U  
Sungkono, M.Si*

## **Abstract**

*Magnetotelluric Method (MT) is used for imaging resistivity of subsurface. The resistivity is obtained by inversion process of MT data (apparent resistivity and phase). In this research, inversion of MT data is used to obtain the 1-D resistivity using Multiobjective Dragonfly algorithm to simultaneously minimize root mean square error of observed and calculated MT data. This algorithm has been tested both synthetics and field data. The result is Multiobjective Dragonfly algorithm can be used to accurately determine the resistivity of subsurface and in accordance with the condition of local lithology.*

**Key words:** *magnetotelluric, apparent resistivity, phase, 1D resistivity, multiobjective dragonfly*

## KATA PENGANTAR

Segala puji penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir di jurusan Fisika FMIPA ITS dengan judul

### **Inversi Data Magnetotellurik 1 Dimensi menggunakan Algoritma Multiobjektif *Dragonfly***

Penulis menyadari bahwa selesainya penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari pertolongan Allah kemudian dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis memuji Allah dan bersyukur kepada-Nya dan tidak lupa pula penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak di antaranya:

1. Bapak Prof. Dr. rer.nat Bagus Jaya Santosa selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa memberikan bimbingan, wawasan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Sungkono M. Si selaku dosen pembimbing sekaligus guru bagi penulis yang telah mengenalkan penulis pada dunia komputasi dan mengajarkan tentang magnetotellurik.
3. Bapak Dr. Yono Hadi P., M. Eng selaku Ketua Jurusan Jurusan Fisika FMIPA ITS yang telah memberikan kemudahan sarana kepada penulis selama kuliah sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
4. Keluarga tercinta, Ayah, Ibu, dan saudara-saudara yang telah memberikan semangat, nasehat, kasih sayang, dan do'a restunya bagi penulis.
5. Team Pak Sungkono Lovers (mas Wisnu, mas nanang, fandy, lali, irwan, amal, ratri) yang telah bersama sama suka maupun duka dalam mengerjakan tugas akhir ini sampai selesai.

6. Teman teman lab geofisika ( Pak kis, mas Reks, mas mif, mas wil, mas Darma, aris, adi, yayan, fikri, dll) yang telah menghiasi lab dengan tawa canda, bantuan, serta dukungan pada penulis.
7. Segenap teman-teman Fisika MESON 2012 yang telah memberikan *support* terbaik bagi penulis.
8. Teman teman Laros yang telah memberikan nasihat, dukungan, motivasi, serta semangat pada penulis.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kesalahan. Mohon kritik dan saran yang membangun guna menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga laporan tugas akhir ini bermanfaat bagi semua pihak. Aamiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, 28 juli 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	i
<b>HALAMAN JUDUL</b>	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	iv
<b>ABSTRAK</b>	v
<b>ABSTRACT</b>	vi
<b>KATA PENGANTAR</b>	vii
<b>DAFTAR ISI</b>	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xi
<b>DAFTAR TABEL</b>	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	xiv
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah/ Ruang Lingkup Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Konsep Dasar Magnetotellurik	5
2.2 Persamaan Maxwell pada Magnetotellurik 1 Dimensi	8
2.3 Permodelan ke Depan Magnetotellurik 1 Dimensi	11
2.4 Algoritma Multi-objektif <i>Dragonfly</i>	14
<b>BAB III. METODOLOGI</b>	
3.1 Permodelan ke Depan	17
3.4 Inversi Data Sintetik	17
3.5 Inversi Data Lapangan	19
3.6 Diagram Alir Penelitian	20

<b>BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Permodelan ke Depan	21
4.1.1 Data Sintetik	21
4.1.2 Permodelan ke Depan	21
4.2 Permodelan ke Belakang (inversi)	25
4.2.1 Penentuan Ruang Model ( <i>search Space</i> )	25
4.2.2 Inversi Data Sintetik	28
4.2.3 Inversi Data Sintetik Menggunakan Pendekatan Lapisan yang Berbeda	33
4.3 Inversi Data Lapangan	35
<b>BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	43
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	45
<b>LAMPIRAN</b>	51
<b>BIODATA PENULIS</b>	61

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4.1</b>	Parameter Model Sintetik	22
<b>Tabel 4.2</b>	Parameter Model Sintetik 5 Lapisan	24

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Konsep Dasar MT	6
<b>Gambar 2.2</b>	Spektrum Medan Magnet Alami dan <i>Dead Band</i>	6
<b>Gambar 2.3</b>	Model Bumi Berlapis Horizontal dengan Parameter Model Berupa Tahanan Jenis dan Ketebalan	12
<b>Gambar 2.4</b>	Algoritma Permodelan ke Depan Magnetotellurik 1 Dimensi	8
<b>Gambar 2.5</b>	Tiga Perilaku Capung	16
<b>Gambar 3.1</b>	Pareto <i>Front</i> Model Algoritma Multi-Objektif <i>Dragonfly</i>	19
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram Alir Pemodelan ke Belakang	20
<b>Gambar 4.1</b>	Hasil permodelan kedepan MT 1D pada model 1, a) Kurva <i>apparent resistivity</i> terhadap perioda, b) Kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) Model bawah permukaan.	22
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil permodelan kedepan MT 1D pada model 2 a) Kurva <i>apparent resistivity</i> terhadap perioda, b) Kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) Model bawah permukaan	23
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil pemodelan kedepan magnetotellurik 1 dimensi menggunakan 5 lapisan a) Kurva <i>apparent resistivity</i> terhadap perioda, b) Kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) Model bawah permukaan	25
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil inversi dengan pemilihan <i>search space</i> yang kurang tepat a) kurva <i>apparent resistivity</i> terhadap perioda, b) kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) model bawah permukaan.	27
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil inversi dengan pemilihan <i>search space</i> yang tepat a) kurva <i>apparent resistivity</i> terhadap perioda, b) kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) model bawah permukaan.	28

<b>Gambar 4.6</b>	<b>Pareto front model inversi model 1 menggunakan 3 lapisan dengan 25 itrasi</b>	30
<b>Gambar 4.7</b>	Hasil inversi model 1 menggunakan parameter model 3 lapisan a) kurva <i>apparent esistivity</i> terhadap perioda, b) kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) model bawah permukaan.	31
<b>Gambar 4.8</b>	Pareto front model inversi model 2 menggunakan 3 lapisan dengan 25 itrasi	32
<b>Gambar 4.9</b>	Hasil inversi model 2 menggunakan parameter model 3 lapisan a) kurva <i>apparent esistivity</i> terhadap perioda, b) kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) model bawah permukaan.	33
<b>Gambar 4.10</b>	Pareto front model inversi model 2 dengan pendekatan 5 lapisan	34
<b>Gambar 4.11</b>	Data lapangan yang mengacu pada model sasaki 1989.	35
<b>Gambar 4.12</b>	Pareto front model inversi model Sasaki (1989)	37
<b>Gambar 4.13</b>	Hasil inversi inversi model sasaki (1989) a) kurva <i>apparent esistivity</i> terhadap perioda, b) kurva <i>phase</i> terhadap perioda, c) model bawah permukaan.	38
<b>Gambar 4.14</b>	Hasil join inversi dari mode TE dan TM menggunakan MT2DinvMatlab oleh Lee (2009) pada data Sasaki (1989).	40
<b>Gambar 4.15</b>	Perbandingan penampang bawah permukaan hasil inversi menggunakan algoritma Multiobjektif <i>dragonfly</i> (warna cyan) dan hasil inversi Lee (2009).	40

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	<i>Source Code</i> Matlab Inversi Data Magnetotellurik 1Dimensi Menggunakan Algoritma Multiobjektif <i>Dragonfly</i>	49
------------	--	----

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Banyak cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui lapisan bawah permukaan bumi. Salah satunya menggunakan metode magnetotellurik (MT). Pada dasarnya metode MT, memanfaatkan distribusi parameter fisis seperti resistivitas dan konduktivitas batuan. Resistivitas dan konduktivitas erat kaitannya dengan porositas, kandungan fluida, dan temperature formasi batuan (Grandis, 1999). Kandungan fluida biasa dicirikan dengan nilai resistivitas yang rendah dan begitu pula sebaliknya dan kandungan gas biasanya dicirikan dengan nilai resistivitas yang tinggi. Dengan menggunakan prinsip tersebut, sering kali metode magnetotellurik digunakan sebagai investigasi awal penentuan cekungan pada eksplorasi hidrokarbon maupun eksplorasi hidrotermal (Kadir, 2011; Wachisbu and Santosa, 2015).

Untuk mengetahui respon MT dalam berbagai eksplorasi tersebut, maka berbagai teknik pemodelan MT terus dikembangkan baik 2 dimensi maupun 3 dimensi. Selain pengembangan teknik pemodelan 2 dimensi dan 3 dimensi, teknik pemodelan MT 1D juga terus dikembangkan (Suryanto, 2009). Hal tersebut didasarkan pada peran penting MT 1D dalam mendapatkan kedetailan distribusi parameter fisis itu sendiri.

Teknik pemodelan MT 1D sendiri terbagi menjadi 2 yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan ke belakang (*inversion modelling*). Yang keduanya sering kali dilakukan secara simultan untuk mengetahui nilai fitness pada pemodelan yang telah dilakukan. Pada kasus MT satu dimensi (1D), parameter fisis seperti resistivitas hanya bervariasi terhadap kedalaman. Dari hal tersebut, maka model yang dibuat dapat merepresentasikan lapisan bawah permukaan bumi dengan parameter model yang berupa resistivitas dan ketebalan.

Mengingat parameter model MT 1D yang hanya berupa resistivitas dan ketebalan, maka pemodelan ke depan MT 1D

juga sederhana dan dapat diselesaikan menggunakan algoritma rekursif (Grandis, 2009). Walaupun demikian, hubungan antara parameter model dan data sangatlah tidak linier.

Inversi data non-linier seperti pada kasus MT 1D, dapat diselesaikan dengan menggunakan metode linierisasi ataupun stokastik. Penyelesaian inversi non linier menggunakan linierisasi memerlukan tebakan awal yang cukup dekat dengan solusi. Selain hal tersebut, solusi dari metode linierisasi sering kali terjebak pada minimum lokal. Padahal solusi optimum inversi non linier selalu berasosiasi pada minimum global (Grandis, 2009).

Pencarian minimum global dapat dilakukan dengan menggunakan metode stokastik. Metode stokastik sendiri terbagi menjadi 2 yaitu pencarian solusi menggunakan objektif tunggal dan pencarian solusi menggunakan multiobjektif. Mengingat MT 1D mempunyai 2 variabel data lapangan yang berupa resistivitas dan fasa, sehingga pencarian pencarian solusi MT 1D dilakukan dengan meminimuman ke dua variabel tersebut.

Untuk meminimumkan 2 variabel menggunakan objektif tunggal, memiliki solusi yang riskan terjebak pada minimum lokal (Sungkono, 2011). Selain itu, penggunaan objektif tunggal diperlukan faktor pembobot. Sedangkan nilai factor pembobot antar satu data dengan data yang lain sangatlah berbeda. Sehingga perlu coba-coba untuk mendapatkan pembobot yang tepat pada data yang diinversikan. Terlebih lagi, penggunaan objektif tunggal juga menyebabkan kesulitan dalam memvalidasi model yang sesuai dengan kondisi geologi yang sebenarnya (Dal Moro, 2008; 2010). Oleh karena itu, proses inversi untuk meminimumkan dua variabel atau lebih, lebih baik menggunakan metode multiobjektif (Dal Moro, 2010, 2008). Salah satu metode multiobjektif untuk pencarian model ialah algoritma multiobjektif *dragonfly*.

Algoritma multiobjektif *dragonfly* dikembangkan oleh Mirjalili (2015). Algoritma ini didasarkan pada tingkah laku capung (*dragonfly*) yang sering kali terbang membuat kerumunan

besar maupun kecil. Tingkah laku terbang secara berkerumun dengan kerumunan besar dan kecil tersebut sesuai dengan prinsip dari metaheuristik sederhana yaitu eksplorasi dan eksploitasi. Walaupun terbang secara berkerumun, capung tidak memiliki pemandu (*leader*) seperti pada algoritma *particle swarm optimization* (PSO). Sehingga algoritma ini hanya didasarkan pada tingkah masing masing individu serta perilaku berkerumun tersebut. Sesuai penelitian Mirjalili (2015), algoritma multiobjektif dragonfly ini lebih cepat jika dibandingkan dengan algoritma multiobjektif yang lain, seperti *non-dominated sorting genetic algorithm* (NSGA II) dan *multiobjective optimization PSO* (MOPSO).

Untuk itu, dalam penelitian ini, dilakukan inversi data magnetotellurik 1D menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly* (Mirjalili, 2015) untuk meminimumkan dua fungsi objektif, yaitu error antara data pengukuran dan perhitungan untuk data phase dan resistivitas semu.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimanakah solusi optimum inversi data MT 1D menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly*?

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Inversi menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly*.
2. Software yang digunakan pada penelitian ini adalah Matlab 2009.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dalam penelitian ini adalah

1. Untuk mendapatkan solusi optimum inversi data MT 1D dimensi menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly*.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah mendapatkan permodelan optimum bumi 1 dimensi dengan metode magnetotelurik menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly*.

### **1.6 Sistematika Laporan**

Penulisan Tugas Akhir (TA) ini terdiri dari abstrak yang berisi gambaran umum dari penelitian. Bab I pendahuluan yang memuat latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan. Bab II tinjauan pustaka berisi tentang dasar-dasar teori yang digunakan sebagai acuan dari penelitian, Bab III metodologi penelitian, Bab IV hasil



## **BAB II**

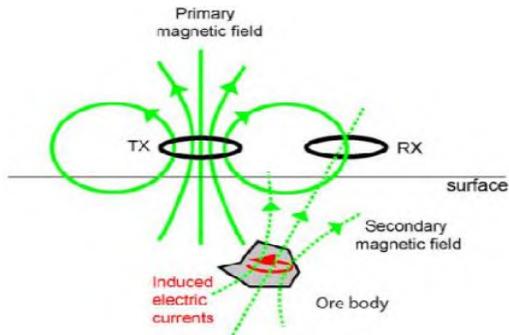
### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Konsep Dasar Magnetotellurik**

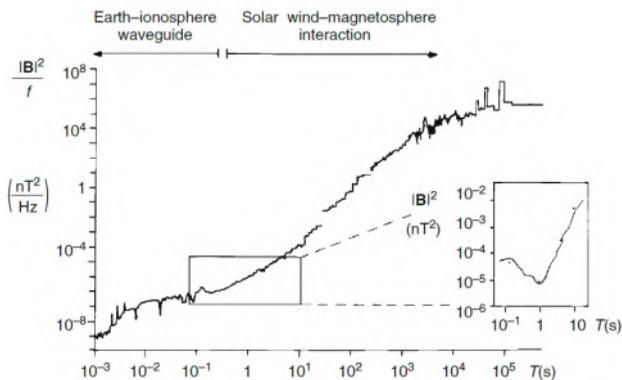
Magnetotellurik (MT) merupakan metode pasif yang melibatkan fluktuasi medan listrik dan medan magnet natural bumi. Arah kedua medan tersebut saling tegak lurus. Yang kemudian dapat digunakan untuk mengetahui distribusi resistivitas bawah permukaan bumi (Simpson, 2005).

Metode MT memanfaatkan gelombang elektromagnetik yang ada di ionosfer yang kemudian berinteraksi dengan bumi sebagai medium konduktor menghasilkan respon berupa nilai resistivitas yang bervariasi. Konsep tersebut dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.1. medan elektromagnetik alami (medan elektromagnetik primer) yang merupakan sumber pada metode ini, menginduksi bumi karena adanya beda potensial. Dari induksi tersebut menghasilkan arus induksi yang disebut dengan *eddy current*. Kemudian arus berputar pada bidang konduktor (bumi) sehingga menghasilkan medan magnet sekunder (Unsworth, 2008). Symbol TX pada Gambar 2.1 menyimbolkan medan magnet primer (medan magnet yang masuk kedalam bumi). Sedangkan RX menyimbolkan medan magnet sekunder yang dihasilkan oleh *eddy current*.

Medan elektromagnetik primer yang merupakan sumber pada metode MT ini, dapat berasal dari dalam dan dari luar bumi. Komponen medan magnet yang berasal dari dalam bumi disebabkan adanya arus konveksi serta medan magnet yang berada di kerak bumi. Namun sinyal tersebut sangat sangatlah kecil. Sehingga sumber dari dalam bumi ini dapat diabaikan. Sedangkan sumber dari luar bumi berasal dari medan magnet yang dihasilkan di atmosfer dan magnetosfer. Sumber sinyal yang digunakan pada metode ini mempunyai rentang  $10^{-3}$ - $10^5$  Hz.



**Gambar 2.1** Konsep dasar MT (Unsworth,2008)



**Gambar 2.2** Spektrum medan magnet alami dan *dead band* (Simpson and Bahr, 2005)

Sumber sinyal yang digunakan pada metode MT ini dapat dilihat seperti pada Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2, terlihat bahwa sinyal berfrekuensi tinggi berasal dari interaksi ion di ionosfer dan sinyal berfrekuensi rendah (kurang dari 1 Hz) berasal dari solar wind yang terjadi di magnetosfer. Pada frekuensi 0.5-5 Hz sinyal EM mengalami pelemahan amplitudo yang menyebabkan melemahnya sinyal yang digunakan. Keadaan ini disebut sebagai *dead band*. Hal tersebut merupakan *noise* alami pada pengukuran data MT (Simpson and Bahr, 2005). Selain *noise* alami, juga

terdapat *noise* buatan yang diakibatkan oleh medan magnet dan medan listrik yang berasal dari luar seperti alat elektronik yang ada di sekitar area pengukuran (Kadir, 2011).

Sumber sinyal magnetotellurik di atas 1 Hz, sebagian besar berasal dari *lightning activity* yang terjadi di ionosfer pada seluruh bagian bumi yang kemudian menjalar di seluruh permukaan bumi. Ketika kilatan tersebut sampai di permukaan bumi, maka menyebabkan medan magnet bumi berubah. Dan ketika hal tersebut terjadi berulang kali, maka akan terbentuk fluks magnetik yang mengakibatkan terjadinya gaya gerak listrik induksi. Dan dari GGL induksi tersebut akan terbentuk medan magnet sekunder yang kemudian terekam pada alat magnetotellurik.

Sumber sinyal magnetotellurik di bawah 1 Hz dihasilkan oleh aktifitas *solar wind* pada magnetosfer. *solar wind* ialah fenomena pergerakan ion H dan He yang kemudian berinteraksi berinteraksi dengan medan magnet bumi. Hal tersebut menyebabkan terbentuknya magnetosfer. perubahan medan magnet di magnetosfer dapat menyebabkan induksi arus listrik yang cukup besar di bagian ionosfer. Perubahan arus yang terjadi di ionosfer tersebut menyebabkan perubahan medan magnet yang terukur pada permukaan bumi (Kadir, 2011).

Aktifitas *solar wind* mempunyai kondisi tertentu yang dapat mempengaruhi medan magnet bumi yaitu:

1. *Solar wind* berada dalam keadaan stabil. Pada keadaan ini, perubahan medan magnet bumi disebabkan oleh adanya rotasi bumi di dalam sistem arus magnetosfer atau biasa yang disebut dengan *solar quiet day variation*(sq). amplitudo variasi harian ini mempunyai *range* nilai antara 10-25 nT dan bervariasi terhadap magnitudo tertentu.
2. *Solar wind* berada pada keadaan aktif. Dalam hal ini, medan magnet bumi mengalami gangguan karena adanya badai magnetik. Keadaan ini terjadi saat adanya perubahan arus selama beberapa hari yang menyebabkan terjadinya medan magnet bumi hingga mencapai 100nT.

Respon medan elektromagnetik di bawah permukaan dapat diperoleh dengan menaikkan periode sounding elektromagnetik (*Simpson and Bahr, 2005*). Prinsip tersebut sesuai dengan persamaan elektromagnetik *skin depth* seperti pada Persamaan (1).

$$p(T) = \sqrt{\left(\frac{T}{\pi\mu\sigma}\right)} \quad (1)$$

dengan  $p$  menotasikan *skin depth*,  $T$  merupakan periode,  $\mu$  menotasikan permeabilitas magnetik (henry/m), dan  $\sigma$  merupakan konduktivitas ( $\text{ohm}^{-1}$ ).

## 2.2 Persamaan Maxwell pada MT 1D

Menurut *Simpson dan Bahr (2005)*, terdapat delapan asumsi dasar MT 1D. Delapan asumsi dasar tersebut adalah sebagai berikut: 1) Persamaan elektromagnetik Maxwell, 2) Bumi tidak menghasilkan energi electromagnet, 3) Medan dapat di konversi dan dianalisa dari sumbernya, 4) Medan EM alami yang dihasilkan oleh sistem ionosfer Dianggap *uniform*, 5) Tidak terdapat akumulasi muatan bebas pada lapisan-lapisan Bumi, 6) Bumi sebagai medium konduktor, 7) Medan perpindahan elektrik bersifat kuasi-statik, 8) Variasi permitivitas listrik dan permeabilitan magnet dalam batuan diasumsikan tidak ada. Kedelapan asumsi dasar inilah yang digunakan sebagai acuan penurunan persamaan-persamaan pada MT 1D.

Peneraan Hukum Maxwell pada metode MT ini didasarkan pada pemanfaatan medan magnet dan medan listrik alamiah bumi sebagai sumber sinyal metode MT. Mekanisme yang dikorelasikan dengan persamaan Maxwell pada metode MT adalah sebagai berikut:

Medan magnet alamiah bumi yang konstan, diganggu oleh medan luar bumi yang diakibatkan oleh aktifitas di ionosfer maupun *solar wind* sehingga mengakibatkan terjadinya fluks magnetik. Dari timbulnya fluks magnetik tersebut, timbullah gaya gerak listrik yang arahnya berlawanan dengan fluks magnetic (*Kadir, 2011*). Hal tersebut sesuai dengan Hukum Faraday, sebagaimana pada Persamaan (2a). Pada arus induksi tersebut

berlaku Persamaan (2b) yang merupakan generalisasi teorema Ampere dengan memperhitungkan hukum kekekalan muatan.

Persamaan (2b) menyatakan bahwa medan magnet timbul akibat fluks total arus listrik yang disebabkan oleh arus konduksi dan arus perpindahan. Persamaan (2c) menyatakan Hukum Gauss yaitu fluks elektrik dalam satu ruang sebanding dengan muatan total dalam ruang tersebut. Selain itu, Persamaan (2d) identik dengan Persamaan (2c) yang berlaku untuk medan magnet, namun dalam konteks ini tidak ada monopole magnetik.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2d)$$

dengan  $\mathbf{H}$  merupakan medan magnet,  $\mathbf{E}$  merupakan medan listrik,  $\mathbf{j}$  merupakan arus perpindahan,  $\mathbf{D}$  merupakan fluks listrik,  $\mathbf{B}$  merupakan fluks magnet,  $q$  merupakan muatan, dan  $t$  merupakan waktu.

Hubungan antara intensitas medan dengan fluks yang terjadi pada medium dinyatakan pada persamaan berikut:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3a)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3b)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (3c)$$

dengan  $\mu$  menotasikan permeabilitas magnetik (henry/m),  $\varepsilon$  mendeskripsikan permitivitas listrik (farad/m), dan  $\sigma$  merupakan konduktivitas ( $\text{ohm}^{-1}$ ).

Mengingat asumsi dasar MT 1D keenam yang menyatakan bahwa, tidak terdapat akumulasi muatan berarti bahwa Persamaan (2c) sama dengan nol. Konsep tersebut juga disebut sebagai konsep bumi homogen *isotropic* yang menyatakan bahwa sifat fisik medium dianggap tidak bervariasi terhadap waktu dan posisi (Grandis, 1999). Kemudian dilakukan substitusi Persamaan (3a), (3b), (3c) pada Persamaan Maxwell sehingga menghasilkan persamaan di bawah ini:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \sigma \mathbf{E} \quad (4b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = q/\varepsilon \quad (4c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4d)$$

Operasi curl pada Persamaan (4a) dan (4b) diketahui bahwa medan listrik yang bervariasi terhadap waktu. Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa distribusi konduktivitasnya. Hasil operasi curl pada kedua persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \sigma \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5)$$

Persamaan 5 merupakan persamaan variable E yang juga dapat diaplikasikan pada variabel H yang keduanya merupakan fungsi posisi dan waktu. Ketika fungsi waktu tersebut dapat direpresentasikan oleh fungsi periodic sinusoidal, maka:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = (i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)\mathbf{E} \quad (6)$$

Dengan:

$$E = E_0(r)e^{i\omega t} \quad (7a)$$

$$H = H_0(r)e^{i\omega t} \quad (7b)$$

Sesuai dengan asumsi dasar MT 1D ke 7 dan 8 bahwa medan perpindahan elektrik bersifat kuasi-statik, sehingga permitivitas batuan dianggap tidak ada (*Simpson dan Bahr, 2005*). Sehingga pada Persamaan (6) komponen yang mengandung permitivitas dianggap nol. Selain medan listrik, persamaan tersebut juga berlaku pada medan magnet. Persamaan-persamaan di atas merupakan persamaan Maxwell pada medan elektromagnetik. Model bumi yang paling sederhana adalah *half space* homogen *isotropic* yang memiliki diskontinuitas resistivitas hanya terdapat pada batas lapisan bumi dan udara. Dalam hal ini setiap komponen medan listrik dan medan magnet hanya bervariasi terhadap kedalaman, sehingga dekomposisi Persamaan 6 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = k^2 E_x \quad (8)$$

$$\text{Dimana } k = \pm \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$$

Solusi elementer dari persamaan diferensial di atas ialah :

$$E_x = Ae^{-kz} + Be^{+kz} \quad (9)$$

dengan  $x, y, z$  merupakan sumbu kartesian yang mana  $z$  merupakan suatu kedalaman. Dekomposisi dari Persamaan 4a, 7b, dan 9 dapat menghasilkan:

$$H_y = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z}$$

$$H_y = \frac{k}{i\omega\mu_0} (Ae^{-kz} - B^{+kz}) \quad (10)$$

Pada medium homogen komponen  $B$  berharga nol. Hal ini terjadi karena medan EM bersifat eksternal (asumsi dasar MT 1D yang ke 2) dan amplitude medan EM haruslah menjadi nol pada kedalaman tak hingga. Komponen  $A$  mengandung faktor attenuasi gelombang EM terhadap kedalaman (*Simpson dan Bahr, 2005*).

Impedansi merupakan perbandingan antara medan listrik dan medan magnetik yang saling tegak lurus dan menjalar pada sumbu  $z$ . Selanjutnya, impedansi ini didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{i\omega\varepsilon_0\rho} \quad (11)$$

dengan  $Z_{xy}$  merupakan impedansi,  $E_x$  merupakan medan listrik pada komponen  $x$ , dan  $H_y$  merupakan medan magnet pada komponen  $y$ .

Impedansi juga dapat dinyatakan sebagai besaran tahanan jenis dan fasa (*Grandis, 1999*), sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_1|^2 \quad (12)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left[ \frac{imZ_1}{ReZ_1} \right] \quad (13)$$

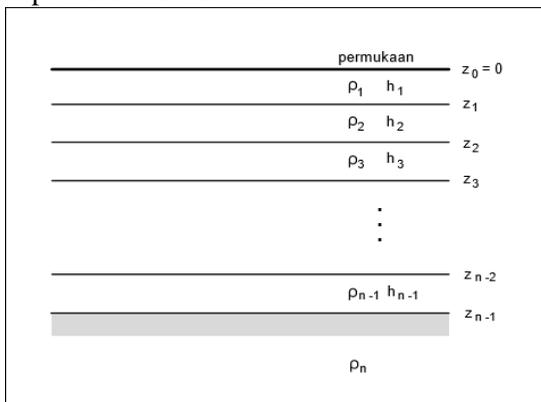
dengan  $Z_1$  merupakan impedansi pada lapisan 1,  $\Phi$  merupakan fasa, dan  $\rho$  merupakan resistivitas.

### 2.3 Pemodelan ke Depan MT 1D

Impedansi merupakan perbandingan antara medan magnet dan medan listrik. Pada kasus MT 1D, nilai impedansi selalu bervariasi terhadap kedalaman. Nilai impedansi tersebut dapat diturunkan menjadi resistivitas maupun konduktivitas sebagai fungsi kedalaman seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.3. model bumi berlapis horizontal dengan resistivitas pada lapisan *half space* yang kontinu serta lapisan di atasnya yang bervariasi pada masing

masing ketebalan dan dapat dihitung sampai resistivitas di permukaan. Berdasarkan hal tersebut, maka dapat diketahui bahwa parameter model dari MT 1D berupa resistivitas dan ketebalan.

Parameter model MT 1D yang hanya berupa resistivitas dan ketebalan, resistivitas pada lapisan diatas *half space* sampai di permukaan (medium homogen *isotropic*) dapat dihitung menggunakan algoritma rekursif (Grandis, 2009). Dasar dari algoritma ini adalah perhitungan resistivitas menggunakan 2 lapisan yang berurutan. Seperti pada sebelumnya yang menyatakan bahwa resistivitas merupakan turunan dari impedansi, sehingga pada algoritma ini pencarian resistivitas dilakukan dengan pencarian impedansi terlebih dahulu.



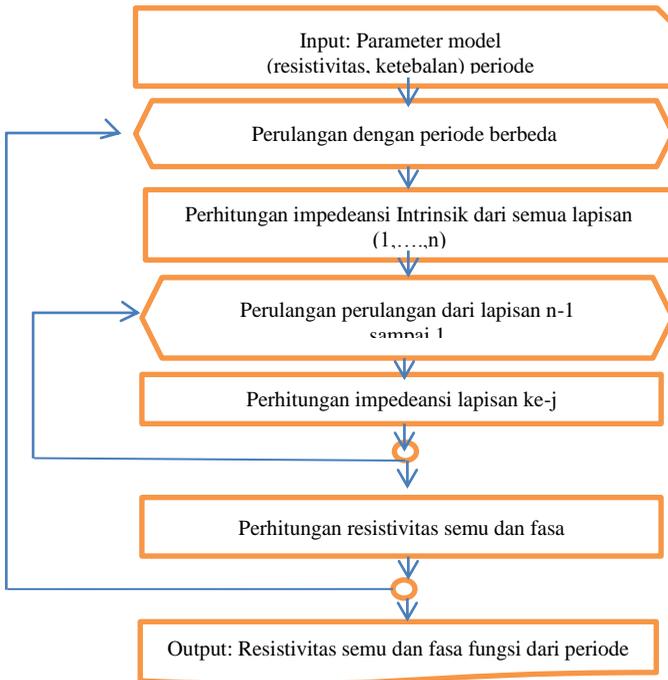
**Gambar 2.3** Model bumi berlapis horizontal dengan parameter model berupa tahanan jenis dan ketebalan (Grandis, 2009)

Persamaan rekursif yang digunakan dalam pencarian impedansi lapisan diatasnya tersebut dapat dilihat seperti pada Persamaan (14) dibawah ini:

$$Z_i = Z_{i0} \frac{1 - R_i \exp(-2k_i h_i)}{1 + R_i \exp(-2k_i h_i)} \tag{14}$$

dengan:  $R = \frac{Z_{0i} - Z_{i+1}}{Z_{0i} + Z_{i+1}}$ ,  $Z_{i0} = \sqrt{\frac{i2\pi u_0 \rho_i}{T}}$ ,  $k_i = \frac{Z_{i0}}{\rho_i}$

dengan  $\rho_i$  dan  $h_i$  masing masing merupakan resistivitas dan ketebalan lapisan ke  $i$ ,  $T$  merupakan periode dan  $Z_{i0}$  merupakan impedansi intinsik lapisan ke  $i$  saat menganggap medium tersebut merupakan medium homogen setengah ruang. Impedansi juga dapat dinyatakan dalam fasa dan resistivitas seperti pada Persamaan (12) dan (13). Diagram alir algoritma rekursif ini sebagaimana Gambar (2.4).



**Gambar 2.4** Diagram alir pemodelan ke depan MT 1D menggunakan algoritma rekursif (Grandis, 2009)

## 2.4 Algoritma Multiobjektif *Dragonfly*

Algoritma *dragonfly* merupakan salah satu metode *guide random search* yang dikembangkan oleh Mirjalilli (2015). Algoritma ini didasarkan pada perilaku terbang pada capung (*dragonfly*). Berbeda dengan algoritma *Particle swan optimization* (PSO) yang didasarkan pada perilaku terbang bergerombol dengan 1 *leader*, pada algoritma *dragonfly* ini melakukan perilaku bergerombol hanya untuk 2 hal yaitu migrasi dan berburu. Ketika bermigrasi, *dragonfly* membentuk kerumunan besar dan menempuh jarak terbang yang jauh. Berbeda dengan berburu, yang hanya membentuk kerumunan kecil dengan lingkup kecil pula. Pada perilaku berburu ini, *dragonfly* terbang masing-masing. Hal tersebut mirip dengan konsep optimasi meta-heuristik yaitu eksplorasi dan eksploitasi (Mirjalili and Lewis, 2015).

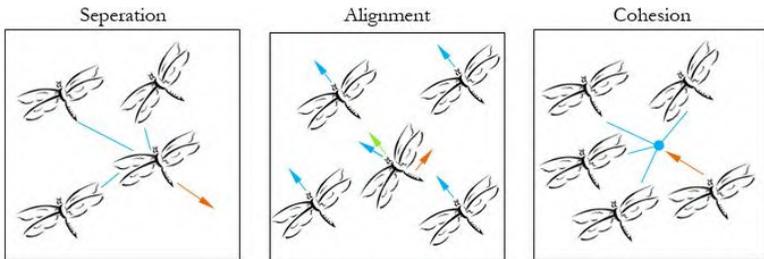
Algoritma *dragonfly* ini menerapkan konsep terbang klasik yaitu *sparasi*, kohesi, dan *alignment*. Ketiga konsep terbang klasik tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 2.5. Gambar ini menunjukkan bahwa *sparasi* disini bertujuan untuk menghindari tabrakan statis dari individu individu lain dalam lingkungan tersebut. *Alignment* bertujuan untuk menyamakan kecepatan individu dengan individu lain dalam lingkungan tersebut yang dalam algoritma ini kecepatan di analogikan sebagai *step*. sedangkan Kohesi lebih mengacu pada kecenderungan individu terhadap pusat massa di lingkungan tersebut. Perilaku berkerumun tersebut dirumuskan pada Persamaan (15), (16), dan (17) dibawah ini:

$$S_i = \sum_{j=1}^n (X - X_j) \quad (15)$$

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n V_j}{n} \quad (16)$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} - X \quad (17)$$

dengan S merupakan *Sparasi*, A merupakan *Alignment*, C merupakan kohesi. Sedangkan X merupakan posisi individu,  $X_j$  merupakan posisi tetangga, dan n merupakan jumlah individu.



**Gambar 2.5** Tiga perilaku capung (Mirjalili, 2015)

Pada algoritma multiobjektif ini, dapat digunakan 2 atau lebih fungsi objective untuk mendapatkan hasil yang optimum dan tidak terjebak pada minimum lokal. Alur yang dilakukan untuk menjalankan algoritma ini adalah sebagai berikut:

1. Memasukkan populasi capung
2. Memasukkan langkah vector (beserta arahnya)
3. Menentukan jumlah maksimum sekmen
4. Perulangan, Ketika kondisi tidak diharapkan maka dilakukan prosedur di bawah ini,
  - a. Evaluasi fungsi objektif pada masing-masing capung
  - b. Memperbarui arsip sehubungan dengan solusi yang diperoleh non dominasi
  - c. Jika arsip penuh maka
    - Menjalankan pemeliharaan arsip untuk menghilangkan salah satu anggota arsip saat ini.
    - Menambahkan solusi baru untuk arsip
  - d. Selesai

- e. Perulangan salah satu tambah solusi baru untuk arsip tersebut berada di luar lingkup *hipersphere*  
Update dan memperbarui posisi semua bidang *hipersphere* untuk menentukan solusi yang baru
- f. Selesai
- g. Pilih sumber makanan dari arsip = *Select Food* ( arsip )
- h. Pilih musuh dari arsip = *Select Enemy* ( arsip )
- i. Perbarui langkah vektor menggunakan Persamaan ( 14)
- j. Memperbarui vektor posisi menggunakan Persamaan (15)
- k. Memeriksa dan memperbaiki posisi baru berdasarkan batas-batas variabel

#### 5. Selesai

Sedangkan untuk persamaan yang menyatakan langkah vector dan perubahan posisi vector, dapat dilihat seperti pada Persamaan (14) dan (15) di bawah ini:

$$T(\Delta x) = \left| \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + 1}} \right| \quad (14)$$

$$X_{t+1} = \begin{cases} -X_t & r < T(\Delta x_{t+1}) \\ X_t & r \geq T(\Delta x_{t+1}) \end{cases} \quad (15)$$

Prinsip dari dari algoritma multiobjektif *Dragonfly* ini adalah pencarian individu non dominan sebagai kemungkinan solusi. Pencarian tersebut dilakukan dengan mengevaluasi masing-masing individu berdasarkan pada tingkah laku individu-individu tersebut seperti yang dijelaskan sebelumnya. Mirjalilli (2015) menyebutkan bahwa penentuan keberhasilan algoritma ini berdasarkan pada pemilihan jumlah individu, maksimum archive, banyaknya perulangan serta pemilihan *search space* yang tepat.

## **BAB III METODE PENELITIAN**

Inversi data MT dilakukan dengan meminimumkan resistivitas dan fasa secara simultan. Untuk meminimumkan dua variabel menggunakan objektif tunggal, menyebabkan solusi berpotensi besar untuk terjebak pada minimum lokal. Oleh karena itu, penggunaan metode multiobjektif pada penelitian ini diharapkan memberikan solusi inversi yang berasosiasi pada minimum global.

Metodologi penelitian ini terdiri dari 3 bagian yaitu pemodelan ke depan (*forward modeling*), pemodelan ke belakang (*inversion modeling*) data sintetik, pemodelan ke belakang data lapangan.

### **3.1 Permodelan ke depan**

Permodelan ke depan ini bertujuan untuk mendapatkan data sintetik (nilai fasa dan resistivitas) berdasarkan parameter model sintetik yang berupa resistivitas dan ketebalan. Algoritma yang digunakan ialah rumus rekursif yang didasarkan pada Grandis (2009). Dimana diagram alir permodelan ke depan ini sesuai dengan Gambar (2.4). Data sintetik ini nantinya digunakan untuk melakukan validasi algoritma atau inversi data sintetik.

### **3.2 Inversi data Sintetik**

Pengujian software disini bertujuan untuk mengetahui keakuratan software tersebut. Pengujian software dilakukan dengan menggunakan data sintetik berdasarkan hasil *forward modeling* dengan model 3 lapisan yang kemudian diinversi menggunakan model yang lapisannya sama dan model yang lapisannya lebih banyak yaitu 5 lapisan. Inversi disini bertujuan untuk mendapatkan kembali data sintetik seperti hasil dari *forward modeling* yang dilakukan sebelumnya.

Inversi data MT ini dilakukan dengan menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly* dengan 2 fungsi objektif yang

berupa resistivitas dan fasa. Fungsi objektif sendiri merupakan selisih antara data sintetis yang didapat dari permodelan ke depan dengan data observasi (data lapangan). Fungsi objektif juga biasa disebut dengan misfit/ error. Persamaan (16) dan (17) dibawah ini merupakan persamaan fungsi objektif dari resistivitas dan fasa:

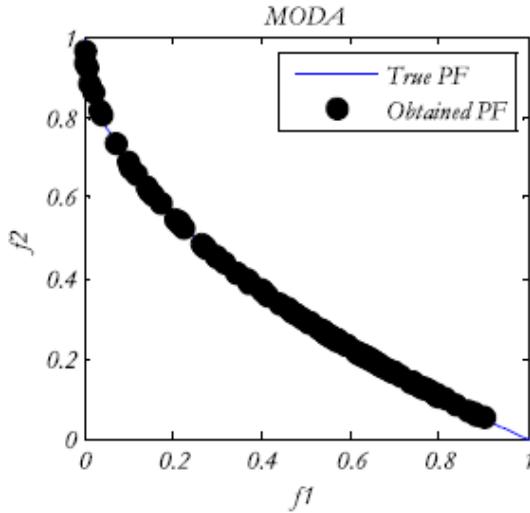
$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_f \left( \log_{10}(d_{obs}^\rho / d_{pred}^\rho) \right)^2} \quad (16)$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_f \left( d_{obs}^\phi - d_{pred}^\phi \right)^2} \quad (17)$$

dengan  $d_{obs}^\rho$  adalah data hasil pengukuran pada nilai  $\rho$  tertentu,  $\rho$  merupakan resistivitas,  $d_{pred}^\rho$  adalah data sintetis yang diperoleh dari pemodelan ke depan pada resistivitas tertentu, N adalah jumlah dari semua  $\rho$ . Begitu pula dengan fungsi objektif yang berupa fasa.

Diagram alir permodelan ini dapat dilihat pada Gambar 3.2. Gambar ini menunjukkan bahwa, algoritma ini diawali dengan *input* data dan parameter. Data yang masukkan berupa data lapangan yang digunakan untuk evaluasi fungsi objektif. Setelah itu dibangkitkan random (0-1) untuk menentukan posisi dan step awal. Yang kemudian dievaluasi fungsi objektive atau errornya berdasarkan hasil random (berupa parameter model yang kemudian dilakukan permodelan ke depan untuk mendapatkan resistivitas dan fasa) dan data lapangan menggunakan Persamaan (16) dan (17).

Setelah dilakukan inversi data, maka di dapatkan model bawah permukaan bumi, yang berupa distribusi resistivitas. Hasil dari inversi berbasis multiobjektif ialah Pareto *front* Model seperti Gambar 3.1 di bawah ini.



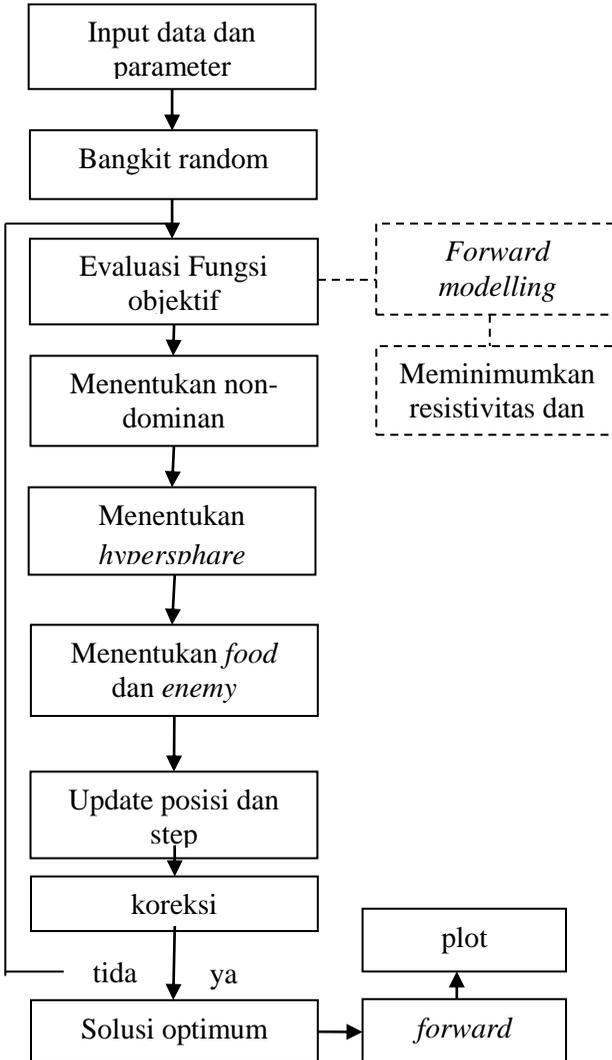
**Gambar 3.1** pareto *front* model algoritma multiobjektif *dragonfly* (Mirjalili, 2015)

Gambar 3.1 merupakan pareto *front* model hasil penyelesaian kasus multiobjektif yang dilakukan oleh (Mirjalili, 2015). Pada kasus inversi ini model yang dipilih adalah semua kemungkinan solusi atau semua individu non-dominan pada pareto *front* model.

### 3.3 Inversi data lapangan

Inversi data lapangan merupakan pengaplikasian software ke data sebenarnya. Data MT yang diinversi berupa data yang didapatkan dari model Sasaki 1989. Stasiun yang digunakan berupa stasiun 3. Tahap inversi yang dilakukan pada inversi data lapangan ini, sama dengan tahap inversi data sintetik sebelumnya. Yang diagram alirnya mengacu pada gambar 3.2.

### 3.4 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3. 2** Diagram alir permodelan ke belakang (MODA)

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Permodelan Ke Depan**

##### **4.1.1 Data Sintetik**

Data sintetik yang dimaksud pada penelitian ini ialah data resistivitas dan fasa pada fungsi perioda pada interval  $10^{-3}$  sampai  $10^3$  detik. Fasa dan resistivitas tersebut didapatkan dari perhitungan permodelan ke depan model sintetik. Dari model sintetik tersebut didapatkanlah data sintetik sebanyak 61 data. Data sintetik MT 1D ada empat jenis yaitu (Maulana, 2010): 1) data sintetik dengan resistivitas yang menurun terhadap kedalaman, 2) data sintetik dengan resistivitas yang semakin meningkat terhadap kedalaman, 3) data sintetik dengan lapisan konduktif diantara lapisan resistif, 4) data sintetik dengan lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Mengingat struktur bumi yang tidak homogen, maka jenis data sintetik yang relevan yang digunakan pada penelitian ini ialah data sintetik dengan lapisan konduktif diantara lapisan resistif dan lapisan resistif diantara lapisan konduktif.

##### **4.1.2 Permodelan ke Depan**

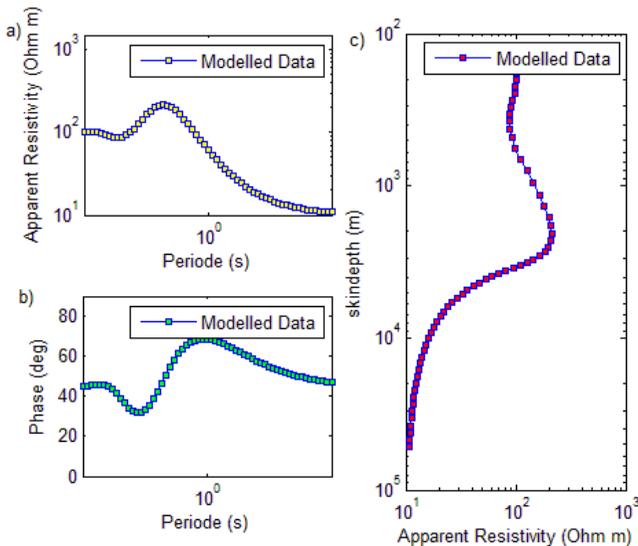
Permodelan ke depan pada penelitian ini menggunakan algoritma rekursif yang didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Grandis (2009). Algoritma rekursif bertujuan untuk mendapatkan data sintetik ( nilai resistivitas dan fasa sebagai fungsi perioda). Permodelan ke depan bertujuan untuk mendapatkan data sintetik dari parameter model yang dimiliki. Parameter model pada permodelan ke depan MT 1D berupa resistivitas dan ketebalan (Grandis, 2009).

Pada penelitian ini, digunakan 2 model yaitu model dengan 3 lapisan yaitu lapisan konduktif diantara lapisan resistif dan lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Nilai dari masing-masing parameter model yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat seperti pada Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Parameter model sintetik

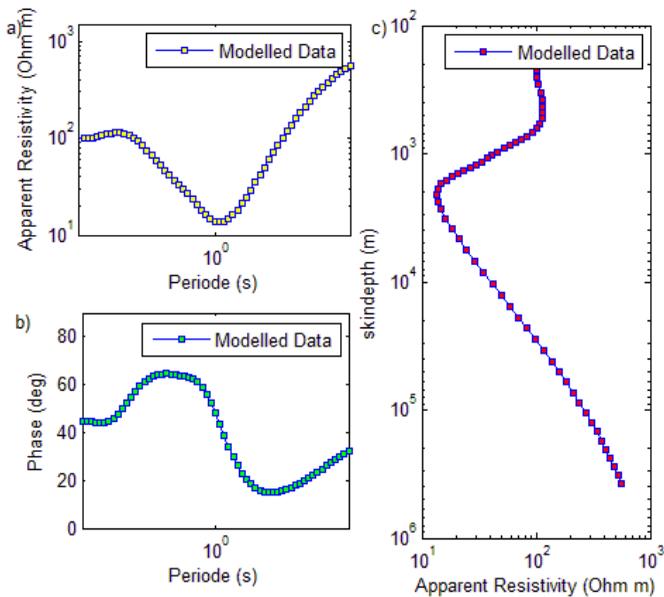
Model 1		Model 2	
Resistivitas (ohm.m)	Ketebalan (m)	Resistivitas (ohm.m)	Ketebalan (m)
100	500	100	500
1000	1500	10	1500
10		1000	

Setelah didapatkan data sintetik dari permodelan ke depan menggunakan parameter model sintetik ini, juga dilakukan perhitungan *skindepth*. *Skindepth* digunakan untuk menentukan ruang pencarian model (*search space*) yang di aplikasikan pada tahap inversi.



**Gambar 4.1** Hasil permodelan ke depan MT 1D pada model 1  
 a) Kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) Kurva *phase* terhadap perioda, c) Model bawah permukaan.

Gambar 4.1a dan 4.1b merupakan hasil permodelan ke depan pada model 1, yaitu lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Setelah dilakukan permodelan ke depan kemudian dilakukan penggambaran antara resistivitas dan fasa terhadap perioda serta Gambar 4.1c merupakan gambar resistivitas semu terhadap kedalaman semu (*skindepth*). Gambar 4.1c menunjukkan bahwa pada bawah permukaan paling tidak ada 3 lapis batuan yang ditunjukkan dengan adanya nilai resistivitas  $1 < \text{resistivitas } 2 > \text{resistivitas } 3$ .



**Gambar 4.2** Hasil permodelan ke depan MT 1D pada model 2 a) Kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) Kurva *phase* terhadap perioda, c) Model bawah permukaan

Gambar 4.2a dan 4.2b merupakan resistivitas semu dan fasa sebagai fungsi kedalaman untuk model 2, yaitu lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Gambar 4.c merupakan kurva resistivitas semu sebagai fungsi kedalaman semu (*skindepth*), yang menunjukkan nilai resistivitas  $1 > \text{resistivitas } 2 < \text{resistivitas } 3$ . Resistivitas 1 yang dimaksud merupakan resistivitas pada lapisan yang dekat dengan permukaan. Karakteristik ini (Gambar 4.1c dan 4.2c) dapat digunakan sebagai acuan dalam penentuan ruang model pada proses inversi data MT berbasis optimum global. Yang mana, ruang model tersebut harus melingkupi nilai resistivitas masing-masing lapisan.

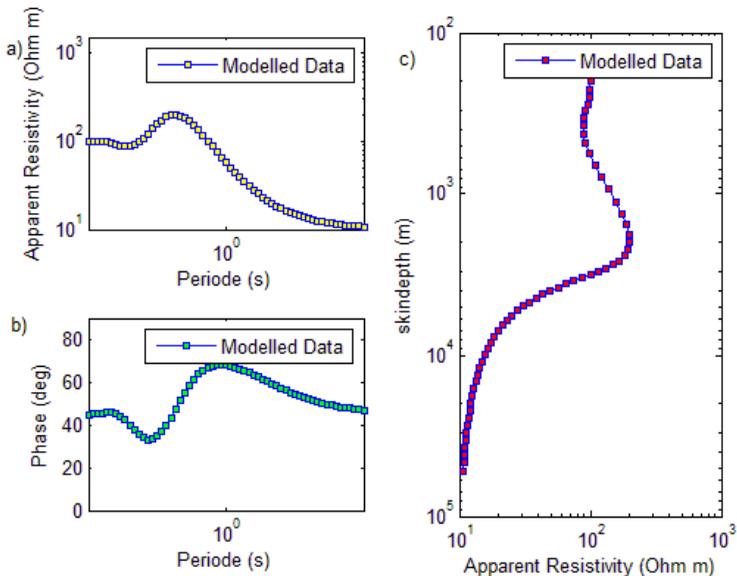
Selain dilakukan permodelan ke depan dengan menggunakan 3 lapisan tersebut, juga dilakukan permodelan ke depan dengan menggunakan 5 lapisan. Permodelan menggunakan 5 lapisan ini nantinya digunakan untuk melakukan inversi pendekatan 5 lapisan pada data sintetik namun menggunakan parameter model yang bernilai beda. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemilihan jumlah lapisan pada inversi data lapangan. Tabel 4.2 dibawah ini merupakan tabel parameter model sintetik 5 lapisan. Model sintetik ini dibuat menyerupai atau mendekati model 1. Dimana harga parameter modelnya adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.2** Parameter model sintetik 5 lapisan (model 3)

	Resistivitas	Ketebalan
1	100	500
2	500	300
3	1000	1000
4	100	100
5	10	

Seperti pada model 1 yaitu lapisan resistif diantara lapisan konduktif, pada model 3 ini juga diambil lapisan resistif diantara lapisan konduktif namun dilakukan pemilihan 5 lapisan.

Penggambaran hasil permodelan ke depan model 3 ini, ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa pemilihan 5 lapisan hasil pemodelan ke depannya hampir sama dengan pemilihan 3 lapisan seperti pada model 1 serta tidak ada perbedaan yang mendasar antara kedua model tersebut.



**Gambar 4.3** Hasil permodelan ke depan magnetotellurik 1 dimensi menggunakan 5 lapisan a) Kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) Kurva *phase* terhadap perioda, c) Model bawah permukaan

## 4.2 Permodelan Ke Belakang (inversi)

### 4.2.1 Penentuan Ruang model (*search space*)

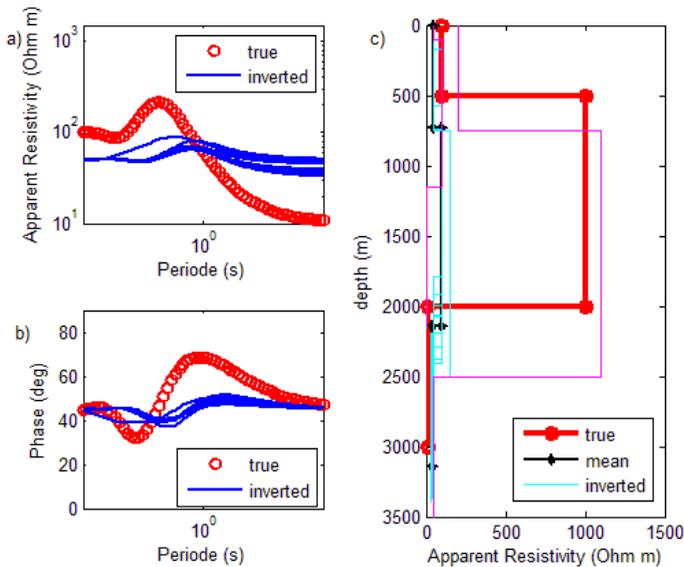
*Search space* merupakan ruang pencarian model pada tahap inversi. Dengan demikian, model yang dicari haruslah berada diantara batas maksimum dan batas minimum *search space*. Penentuan *search space* untuk inversi data MT dapat

dilakukan dengan menggunakan *skindepth* yang telah didapatkan, sebagaimana pemaparan pada subbab diatas.

Selain memperhatikan *skindepth*, dalam penentuan *search space* juga perlu di perhatikan faktor reduksi dari permodelan ke depan yang dilakulakukan. Sehingga acuan utama penentuan *search space* merupakan parameter model dari data yang akan dicari. *Search space* hendaknya tidak terlalu luas. *Search space* yang terlalu luas, menyebabkan model yang perlu dievaluasi semakin banyak dan sering kali solusi yang didapatkan bukanlah solusi optimum. Gambar 4.4 merupakan salah satu contoh model inversi dengan penentuan *search space* yang kurang tepat. Hal tersebut menyebabkan solusi jauh dari optimum yang ditunjukkan dengan fitting dari model inversi (garis biru) dengan model yang dicari (lingkaran merah) kurang tepat.

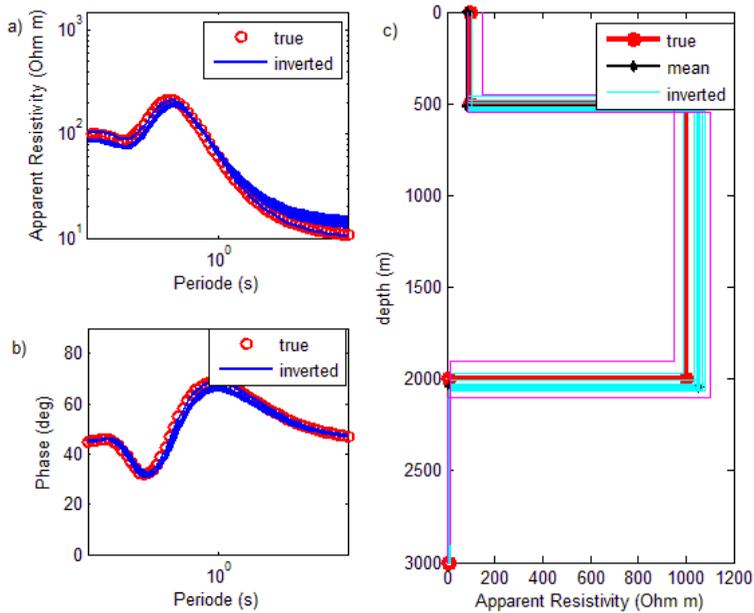
*Search space* yang digunakan pada pencarian model Gambar 4.4 adalah sebagai berikut: ketebalan maksimum 750 dan 1750 sedangkan ketebalan minimum 100 dan 750, resistivitas maksimum 200, 1100, dan 50 sedangkan resistivitas minimum 50, 100, dan 0,1. *Search space* tersebut digunakan untuk pencarian model 1 (Gambar 4.1). Pencarian tersebut didasarkan pada *skindepth* yang digambarkan pada Gambar 4.1. Yang mana pencarian tersebut hanya berasosiasi pada data sintetik hasil permodelan ke depan.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa pencarian model yang hanya didasarkan pada data yang akan dicari dan *search space* yang begitu luas menyebabkan hasil inversi jauh dari solusi. Selanjutnya, Gambar 4.5 merupakan hasil inversi dengan penentuan *search space* yang tepat dari model 1. *Search space* yang digunakan pada pencarian tersebut adalah sebagai berikut: ketebalan maksimum 550 dan 1600 sedangkan ketebalan minimum 450 dan 1450 meter. Resistivitas maksimum yang digunakan adalah 150, 1100, dan 15 ohmmeter. Resistivitas minimum yang digunakan 85, 950, dan 0.1 ohmmeter.



**Gambar 4.4** Hasil inversi dengan pemilihan *search space* yang tepat a) kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan bahwa pemilihan *search space* yang tepat memberikan hasil inversi yang baik pula. Sehingga dapat diketahui bahwa penentuan *search space* / ruang model yang baik adalah ruang model yang tidak terlalu lebar. Karena semakin luas ruang model maka semakin luas pula area yang harus dievaluasi. Sehingga dibutuhkan individu dan iterasi yang lebih banyak pula untuk mendapatkan solusi optimum dibandingkan dengan ruang model yang sempit.



**Gambar 4.5** Hasil inversi dengan pemilihan *search space* yang tepat a) kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

Selain hal-hal yang telah dipaparkan diatas, penentuan ruang model juga didasarkan pada karakteristik algoritma. Ruang model yang sempit merupakan karakteristik sekaligus kelemahan dari algoritma multiobjektif *dragonfly* ini.

#### 4.2.2 Inversi Data Sintetik

Pengujian software dilakukan untuk mengetahui keabsahan dari software tersebut. Pengujian software sini menggunakan

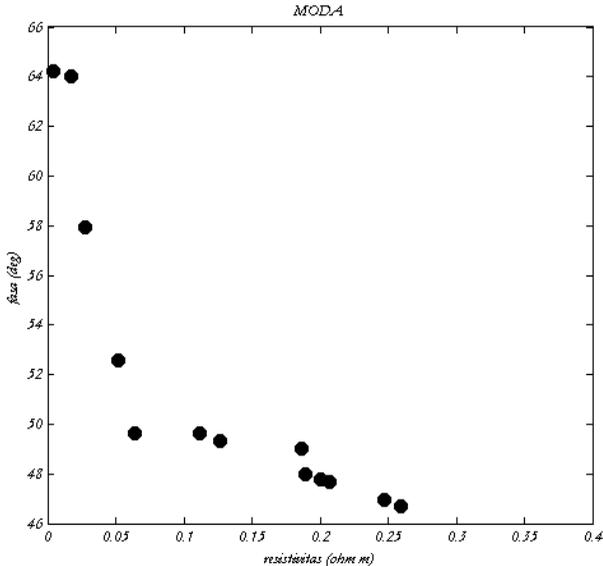
data sintetik dari parameter model sintetik guna mendapatkan kembali data sintetik tersebut. Inversi dari data sintetik tersebut dilakukan dengan menggunakan pendekatan 3 lapisan dan juga 5 lapisan. Yang masing-masing dilakukan pada model 1 dan model 2. Keberhasilan suatu software dapat dilihat berdasarkan penggambaran fungsi objektif hasil inversi tersebut. Penggambaran fungsi objektif dapat dilihat dari pareto *front* model. Fungsi objektif sendiri merupakan error antara data lapangan dan data perhitungan / hasil inversi.

Ngatchou (2008) menyebutkan bahwa tujuan utama optimasi algoritma multiobjektif (MOO) adalah untuk meminimumkan atau memaksimumkan fungsi objektif. Dari meminimumkan dan memaksimumkan fungsi objektif tersebut dapat dihasilkan suatu sekumpulan solusi pareto *front* model. Dimana kurva dari pareto *front* model tergantung pada tujuan optimasi. Dalam kasus inversi MT 1 D ini, optimasi bertujuan untuk meminimumkan fungsi objektif, yakni error antara data pengukuran dan data perhitungan.

Pada inversi model 1 ini dilakukan pemilihan 100 individu dan 100 *archive* non-dominan serta dilakukan perulangan sebanyak 25 iterasi. Selain penentuan parameter algoritma seperti diatas, hal yang mempengaruhi keberhasilan algoritma ini adalah penentuan ruang model seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya. *Search space*/ ruang model yang digunakan pada inversi ini adalah ketebalan maksimum 550 dan 1550 meter, ketebalan minimum adalah 450 dan 1450 meter, resistivitas maksimum 120, 1050, dan 15 ohmmeter, serta resistivitas minimum 85, 950, dan 0.01 ohmmeter. Ruang model digambarkan pada Gambar 4.6 c yang berupa garis pink.

Penggambaran pareto *front* model dari hasil inversi model 1 dapat dilihat pada Gambar 4.6 dengan sumbu x merupakan nilai error dari resistivitas dan sumbu y merupakan nilai error dari fasa. Resistivitas mempunyai error yang kecil dengan kisaran 0-0.25 sedangkan fasa mempunyai error yang besar yaitu kisaran 49-64.

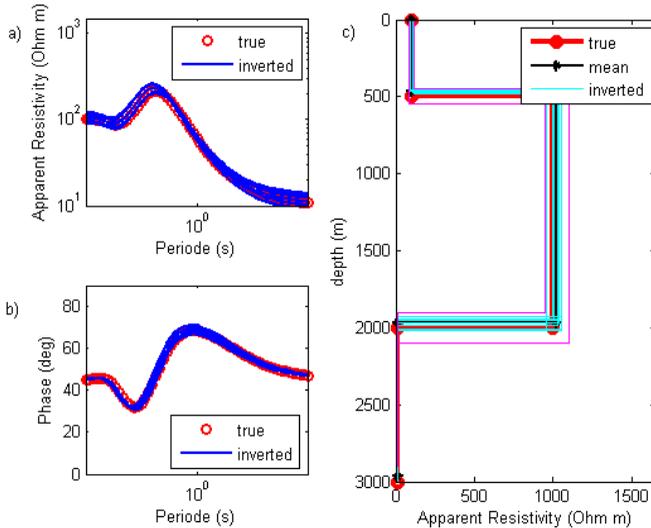
Sebab biasanya data fasa kurang bagus (Grandis, 2009), sehingga pada nilai error fasa yang cukup besar ini dapat ditolerir. Oleh karena itu, pada inversi ini semua individu non-dominan diambil sebagai semua kemungkinan solusi dan rata-rata dari hasil semua kemungkinan solusi yang digunakan sebagai pembanding.



**Gambar 4.6** Pareto *front* model inversi model 1 menggunakan 3 lapisan dengan 25 itrasi

Setelah didapatkan kemungkinan solusi yang berupa parameter model, maka dilakukan penggambaran kemungkinan solusi. Gambar 4.7a dan 4.7b merupakan semua solusi yang mungkin dari inversi model 1 dengan warna merah merupakan *true data* dan warna biru merupakan data perhitungan. Gambar ini menunjukkan bahwa data perhitungan dan data sebenarnya sangat dekat. Gambar 4.7c merupakan perbandingan model yang sebenarnya dan model hasil inversi. Yang mana, kedua model ini

sangat dekat. Artinya, metode inversi cukup baik dalam mengestimasi parameter model.

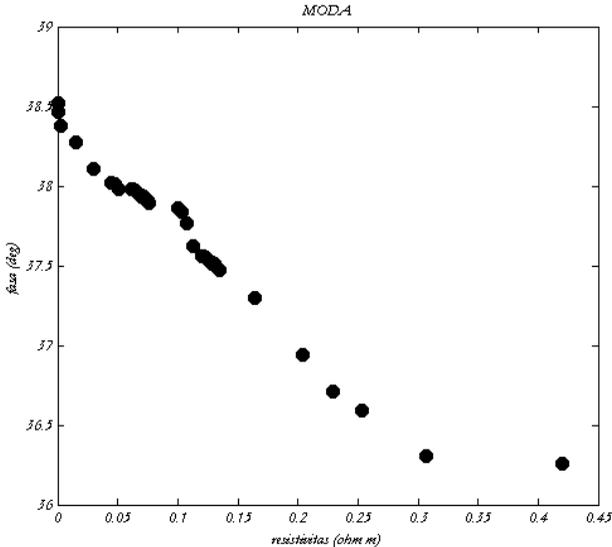


**Gambar 4.7** Hasil inversi model 1 menggunakan parameter model 3 lapisan a) kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

Selain inversi pada model 1, pada penelitian ini juga dilakukan inversi pada model 2 yaitu lapisan konduktif diantara lapisan resistif. Pada inversi ini dilakukan pemilihan 100 individu, 100 *archive* non-dominan dan 25 iterasi. Dan pemilihan ruang model digambarkan dengan garis warna *pink* pada Gambar 4.9c.

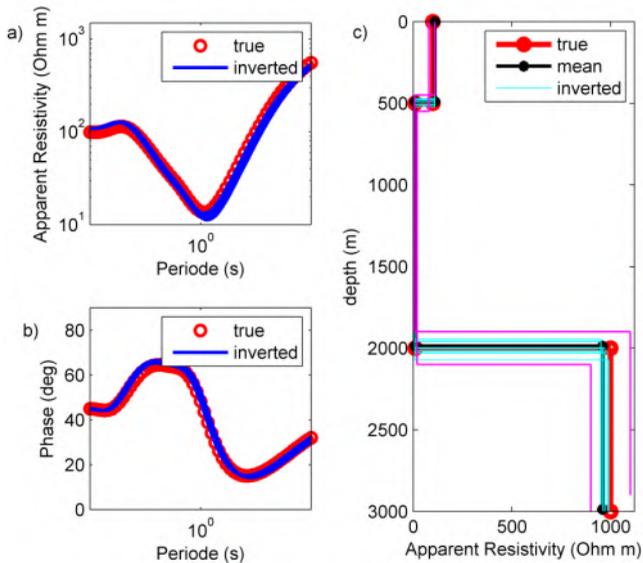
Penggambaran *pareto front* model dan kemungkinan solusi hasil inversi dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9. Nilai fungsi objektif / error pada *pareto front* model berkisar antara 36-38 untuk fasa dan 0-0.42 untuk resistivitas. Selain menyatakan nilai error, penggambaran *pareto front* model juga menyatakan

distribusi individu non-dominan yang diambil sebagai kemungkinan solusi.



**Gambar 4.8** Pareto *front* model inversi model 2 menggunakan 3 lapisan dengan 25 itrasi

Penggambaran semua kemungkinan solusi pada Gambar 4.9a dan 4.9b, menunjukkan bahwa kemungkinan solusi tersebut sangatlah dekat dengan data yang sebenarnya (bulatan merah). Hal tersebut juga ditunjukkan oleh penggambaran model bawah permukaan Gambar 4.9c yang terlihat bahwa hasil inversi dan data lapangan memiliki kesesuaian yang cukup bagus. Hal tersebut mengindikasikan kekonvergensi dari hasil inversi. Hal tersebut berarti bahwa algoritma ini juga mampu menginversi model 2 dengan cukup baik.

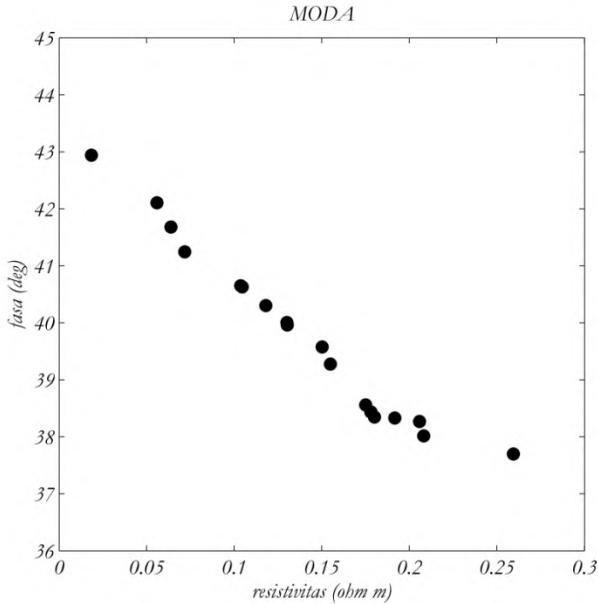


**Gambar 4.9** Hasil inversi model 2 menggunakan parameter model 3 lapisan a) kurva *apparent esistivity* terhadapperioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

#### 4.2.3 Inversi Data Sintetik Menggunakan Pendekatan Lapisan yang Berbeda

Inversi data sintetik ini dilakukan pada model 2 yaitu lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Model 2 ini diinversi menggunakan pendekatan 5 lapisan. Pemilihan lapisan yang berbeda untuk menginversi model 2 ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemilihan banyaknya lapisan pada kasus inversi. *Search space* atau ruang model yang digunakan pada inversi ini yaitu sebagai berikut: ketebaan maksimum 525, 320, 1350, dan 120 meter; ketebalan minimum adalah 475, 270, 1250, 75 meter, sedangkan *search space* parameter model resistivitas yaitu resistivitas maksimum adalah 110, 55, 20, 650, dan 1025 ohmmeter, resistivitas minimum 90, 25, 8.5, 500, dan 985

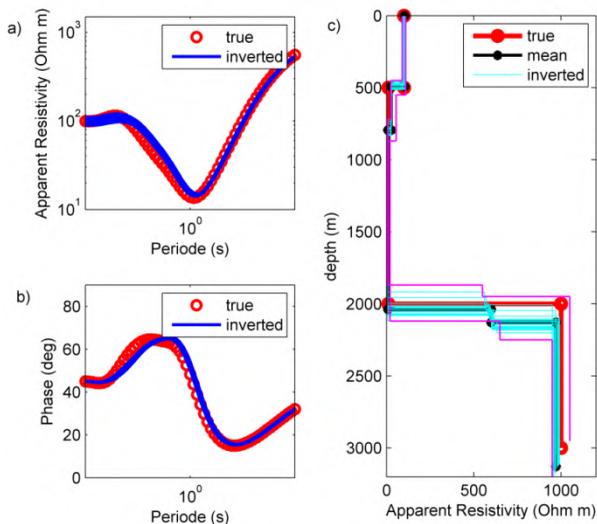
ohmmeter. Penggambaran ruang model sebagaimana pada Gambar 4.8c yang berupa warna pink. Model 2 ini diinversi menggunakan iterasi sebanyak 25 kali melalui populasi individu sebesar 100, serta maksimum *archive* sebanyak 100 individu.



**Gambar 4.10** pareto *front* model inversi model 2 dengan pendekatan 5 lapisan

Pareto *front* model hasil inversi model 2 (lapisan konduktif diantara lapisan resistif) dengan menggunakan pendekatan 5 lapisan ini dapat dilihat sebagaimana Gambar 4.10. Gambar ini menunjukkan bahwa resistivitas mempunyai error sekitar 0-0.27 sedangkan fasa mempunyai error sekitar 38-43. Dari hal tersebut terlihat perbedaan nilai yang signifikan antar keduanya. Grandis (2009) menyebutkan bahwa fasa mempunyai kualitas yang kurang baik sehingga sering kali diabaikan pada inversi menggunakan objektif tunggal. Pernyataan dari Grandis

(2009) tersebut dibuktikan dengan nilai error yang besar dari fasa baik menggunakan pendekatan 5 lapisan maupun 3 lapisan yang selalu lebih tinggi daripada resistivitas.



**Gambar 4.11** pareto *front* model inversi dengan pendekatan 5 lapisan a) kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

Gambar 4.11a dan 4.11b secara berurutan merupakan perbandingan antara data resistivitas semu dan fase perhitungan (*inverted*) dan data observasi. Gambar ini menunjukkan bahwa data inversi atau perhitungan berhimpit (dekat atau mirip) dengan data perhitungan. Kemiripan ini juga terjadi pada model bawah permukaan sebenarnya dengan model bawah permukaan hasil inversi. Selanjutnya, dengan membandingkan dengan hasil inversi model 2 dengan menggunakan 3 lapis batuan seperti pada Gambar 4.9 dengan hasil inversi menggunakan 5 lapisan ini, dapat diketahui bahwa inversi data MT yang dilakukan dengan jumlah lapisan yang lebih besar dari model yang sebenarnya akan

menghasilkan model bawah permukaan yang hampir sama dengan model yang sebenarnya. Artinya, secara otomatis inversi menggunakan multiobjektif ini mirip dengan hasil inversi objektif tunggal dengan konstrain resistivitas, sebagaimana dalam Grandis (2009).

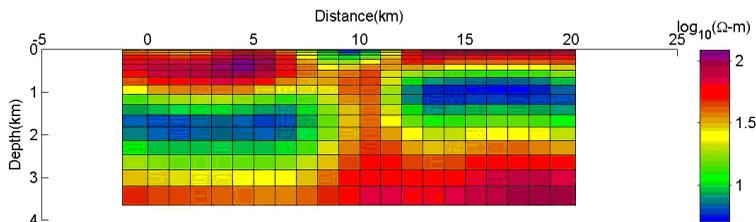
Pada semua inversi data sintetik diatas, cenderung digunakan individu dan perulangan yang sedikit yaitu 100 individu dan 25 itrasi. Hal ini dikarenakan algoritma ini cenderung cepat konvergen seperti halnya algoritma cepat lain yang cepat konvergen pada minimum lokal. Dan ini merupakan kelemahan dari algoritma multiobjektif *dragonfly*. Kelemahan tersebut berkaitan dengan ketidak adanya fungsi *mutate* seperti pada algoritma multi objektif *differensial evolution*, multi objektif *particle swan optimization*, dan yang lainnya. *Mutate* sendiri berfungsi untuk mengarahkan solusi agar berasosiasi pada minimum global dan tidak terjebak pada minimum lokal.

Disisi lain, algoritma multiobjektif ini juga memiliki kelebihan seperti yang telah dijelaskan pada pendahuluan. Dimana dengan menggunakan algoritma multiobjektif maka tidak diperlukan faktor pembobot seperti yang digunakan pada algoritma objektif tunggal. Karena pembobot yang digunakan pada algoritma objektif tunggal didapatkan dengan coba-coba untuk mendapatkan pembobot yang tepat.

### 4.3 Inversi Data Lapangan

Inversi data lapangan dimaksudkan untuk menguji algoritma multiobjektif *dragonfly* pada data pengukuran. Data pengukuran yang digunakan yaitu data yang berasal dari model yang digunakan oleh Sasaki (1989). Penampang 2D dari model Sasaki ini dapat dilihat seperti pada Gambar 4.11. Menurut Lee (2009) model Sasaki ini mempunyai spasi antar stasiun sebesar 2000 meter. Stasiun 1 yang ditunjukkan oleh titik nol pada gambar tersebut mempunyai jarak 500m dari tepi penampang. Lintasan terbentang mulai dari meter ke 500 sampai meter ke 18500. Sehingga stasiun yang digunakan sebanyak 10 stasiun. Frekuensi

yang digunakan oleh Sasaki (1989) ini berjumlah 9 frekuensi yang masing-masing bernilai sebagai berikut: 0.1, 0.22, 0.5, 1, 2.2, 5, 10, 22, dan 50 Hz.



**Gambar 4.11** Data lapangan yang mengacu pada model sasaki 1989.

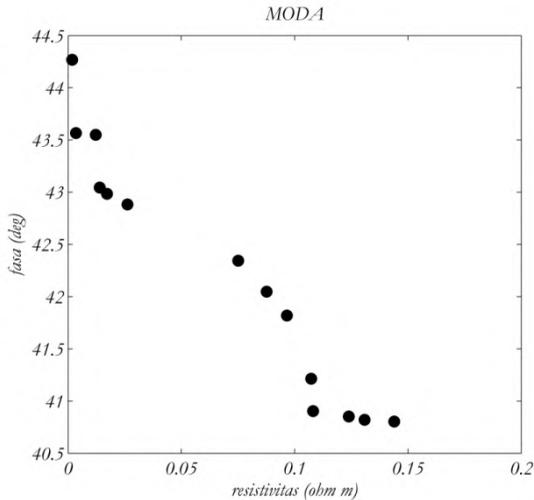
Pada penelitian ini digunakan data dari stasiun 3 yang terletak pada km yang ke 4,5. Jumlah lapisan dan *search space* yang digunakan pada inversi ini didasarkan pada nilai resistivitas yang tampak pada Gambar 4.11. berdasarkan gambar tersebut, pada stasiun 3 terdapat 3 lapisan. Sehingga pada inversi ini digunakan 4 parameter model resistivitas dan 3 parameter model ketebalan. Dengan resistivitas pada lapisan terakhir di *generate* sebagai lapisan *half space*.

Berdasarkan gambar tersebut pada lapisan 1 mempunyai nilai resistivitas berkisar 100 ohm meter. Pada lapisan 2 mempunyai nilai resistivitas yang berkisar 10 ohm meter, serta pada lapisan 3 mempunyai resistivitas yang berkisar 31.6 ohm meter. Selain resistivitas, berdasarkan gambar tersebut juga dapat ditentukan harga parameter model ketebalan yaitu pada lapisan 1 mempunyai nilai sekitar 1000 meter, pada lapisan 2 mempunyai ketebalan sekitar 1800 meter, dan lapisan dibawahnya merupakan *half space*.

Berdasarkan nilai resistivitas pada masing-masing lapisan itulah digunakan *search space* sebagai berikut: ketebalan maksimum yaitu 1100, 1800, 5 meter, dan ketebalan minimum yaitu 1000, 1750, 0.1 meter, serta resistivitas maksimum yaitu 120, 15, 27.5, 36 ohm meter, sedangkan resistivitas minimum

yaitu 90, 10, 22, 20 ohm meter. Inversi ini dilakukan dengan menggunakan individu sebanyak 100 individu. *Archive* maksimum sebesar 100 individu dan perulangan sebanyak 25 kali.

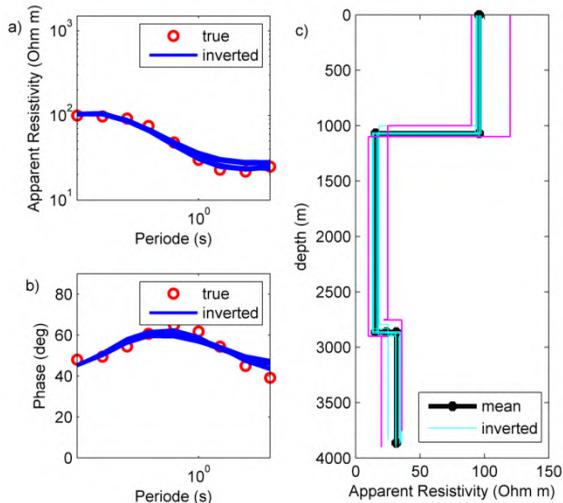
Penggambaran pareto *front* model hasil inversi ini dapat dilihat pada Gambar 4.12.



**Gambar 4.12** Pareto *front* model inversi model Sasaki (1989)

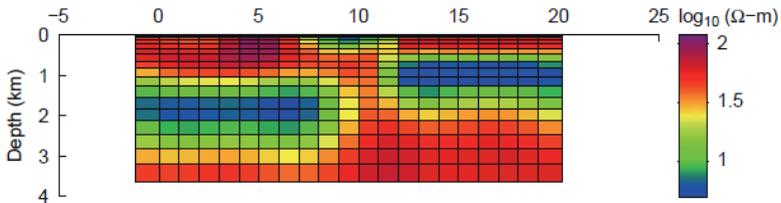
Gambar 4.12 menunjukkan distribusi individu non- dominan yang ditunjukkan dengan distribusi error untuk data fasa dan resistivitas semu, dengan distribusi yang cukup baik. Yakni, jarak antar satu individu dengan individu yang lain tidak terlalu jauh serta membentuk sebuah garis tertentu. Selain distribusi individu non-dominan tersebut, juga dapat diketahui nilai error pada fasa dan resistivitas yaitu bekisar pada 40.5-44.5 untuk fasa dan 0-0.15 untuk resistivitas. Sebagaimana inversi pada data sintetik, nilai error pada fasa lebih tinggi dibandingkan dengan nilai error pada resistivitas. Hal tersebut sesuai yang dijelaskan

oleh Grandis (2009), yang menyatakan bahwa kualitas data fasa tidaklah sebgus kualitas data resistivitas.



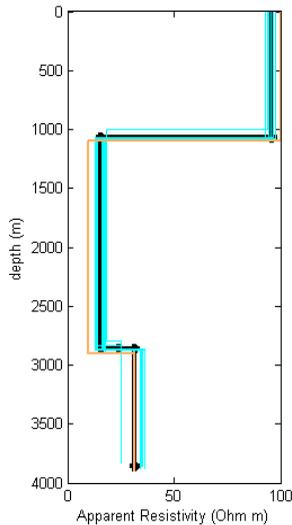
**Gambar 4.13** hasil inversi inversi model sasaki (1989) a) kurva *apparent resistivity* terhadap periode, b) kurva *phase* terhadap periode, c) model bawah permukaan.

Gambar 4.13a dan 4.13b merupakan penggambaran kemungkinan solusi dan data sebenarnya. Yang mana, data sebenarnya dan data perhitungan tampak berhimpit. Gambar 4.13c merupakan model bawah permukaan hasil inversi. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa, data dari model sasaki pada stasiun 3 ini mempunyai sekitar 3 lapisan yaitu lapisan konduktif diantara lapisan resistif. Dimana lapisan yang dekat dengan permukaan mempunyai nilai resistivitas yang paling besar. Pada penelitian ini digunakan hasil inversi Lee (2009) menggunakan software MT2DinvMatlab sebagai pembanding.



**Gambar 4.14** Hasil join inversi dari mode TE dan TM menggunakan MT2DinvMatlab oleh Lee (2009) pada data Sasaki (1989).

Gambar 4.14 merupakan hasil inversi 2 dimensi Lee (2009). Pada gambar tersebut stasiun 3 terletak pada KM ke 4.5. gambar tersebut menunjukkan adanya sekitar 3 lapisan. Dimana lapisan pertama mempunyai nilai resistivitas sekitar 100 ohm-meter, lapisan kedua sekitar 10 ohm-meter, dan lapisan terakhir sekitar 30 ohm-meter.



**Gambar 4.15** Perbandingan penampang bawah permukaan hasil inversi menggunakan algoritma Multiobjektif *dragonfly* (warna cyan) dan hasil inversi Lee (2009).

Perbandingan hasil inversi data sasaki (1989) pada stasiun 3 dengan menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly* dan hasil inversi Lee (2009) ini dinyatakan oleh Gambar 4.15. Berdasarkan penggambaran bawah permukaan kedua hasil inversi tersebut (Gambar 4.15), hasil inversi Lee (2009) (warna orange) tampak berimpit dengan beberapa individu dari kemungkinan solusi hasil inversi dengan menggunakan algoritma multiobjektif *dragonfly* (warna cyan). Walau ada individu-individu yang menyimpang. Hal tersebut mengindikasikan bahwa algoritma multiobjektif *dragonfly* ini dapat digunakan untuk mengestimasi resistivitas bawah permukaan data lapangan.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## LAMPIRAN A

### **Source Code Matlab Inversi Data Magnetotellurik 1D Menggunakan Algoritma Multiobjektif Dragonfly**

```
clc;
clear;
close all;
global T rhoobs phaseobs

% Change these details with respect to your
problem%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%input data lapangan
data1=xlsread('MT.xls');
rhoobs=data1(:,2);
phaseobs=data1(:,3);
T=data1(:,1);

%deskripsi fo
ObjectiveFunction=@MT;
h=[500 1500];
hmax=[log10(550) log10(1550)];
hmin=[log10(450) log10(1450)];
rho=[100 1000 10];
asli=[h rho];
rmax=[log10(10) log10(750) log10(15)];
rmin=[log10(0.1) log10(600) log10(0.1)];
mu=pi*4*1e-7;
%banyaknya variabel tetap
lb=[hmin rmin]; %batas bawah
ub=[hmax rmax]; %batas atas
dim=5;%banyaknya variabel tetap
obj_no=2;

% Initial parameters of the MODA algorithm
max_iter=500;
N=100;
ArchiveMaxSize=100;
```

```

Archive_X=zeros(100,dim);
Archive_F=ones(100,obj_no)*inf;

Archive_member_no=0;

r=(ub-lb)/2;
V_max=(ub(1)-lb(1))/10;

Food_fitness=inf*ones(1,obj_no);
Food_pos=zeros(dim,1);

Enemy_fitness=-inf*ones(1,obj_no);
Enemy_pos=zeros(dim,1);

X=initialization(N,dim,ub,lb);
fitness=zeros(N,2);

DeltaX=initialization(N,dim,ub,lb);
iter=0;

position_history=zeros(N,max_iter,dim);

for iter=1:max_iter

    r=(ub-lb)/4+((ub-lb)*(iter/max_iter)*2);

    w=0.9-iter*((0.9-0.2)/max_iter);

    my_c=0.1-iter*((0.1-0)/(max_iter/2));
    if my_c<0
        my_c=0;
    end

    if iter<(3*max_iter/4)
        s=my_c;           % Seperation weight
        a=my_c;           % Alignment weight
    end
end

```

```

        c=my_c;           % Cohesion weight
        f=2*rand;        % Food attraction
weight
        e=my_c;           % Enemy distraction
weight
        else
            s=my_c/iter;   % Seperation weight
            a=my_c/iter;   % Alignment weight
            c=my_c/iter;   % Cohesion weight
            f=2*rand;      % Food attraction
weight
            e=my_c/iter;   % Enemy distraction
weight
        end

        for i=1:N %Calculate all the objective
values first

        Particles_F(i,:)=ObjectiveFunction(X(:,i)');
            if
dominates(Particles_F(i,:),Food_fitness)
                Food_fitness=Particles_F(i,:);
                Food_pos=X(:,i);
            end

            if
dominates(Enemy_fitness,Particles_F(i,:))
                if all(X(:,i)<ub') && all(
X(:,i)>lb')
                    Enemy_fitness=Particles_F(i,:);
                    Enemy_pos=X(:,i);
                end
            end
        end

        [Archive_X, Archive_F,
Archive_member_no]=UpdateArchive(Archive_X,
Archive_F, X, Particles_F, Archive_member_no);

```

```

    if Archive_member_no>ArchiveMaxSize

Archive_mem_ranks=RankingProcess(Archive_F,
ArchiveMaxSize, obj_no);
    [Archive_X, Archive_F,
Archive_mem_ranks,
Archive_member_no]=HandleFullArchive(Archive_X,
Archive_F, Archive_member_no, Archive_mem_ranks,
ArchiveMaxSize);
        else

Archive_mem_ranks=RankingProcess(Archive_F,
ArchiveMaxSize, obj_no);
        end

    Archive_mem_ranks=RankingProcess(Archive_F,
ArchiveMaxSize, obj_no);

    % Chose the archive member in the least
population area as foods
    % to improve coverage

index=RouletteWheelSelection(1./Archive_mem_rank
s);
    if index== -1
        index=1;
    end
    Food_fitness=Archive_F(index,:);
    Food_pos=Archive_X(index,:)';

    % Chose the archive member in the most
population area as enemies
    % to improve coverage

index=RouletteWheelSelection(Archive_mem_ranks);
    if index== -1
        index=1;
    end
    Enemy_fitness=Archive_F(index,:);

```

```

Enemy_pos=Archive_X(index,:);

for i=1:N
    index=0;
    neighbours_no=0;

    clear Neighbours_V
    clear Neighbours_X
    % Find the neighbouring solutions
    for j=1:N
        Dist=distance(X(:,i),X(:,j));
        if (all(Dist<=r) && all(Dist~=0))
            index=index+1;
            neighbours_no=neighbours_no+1;

Neighbours_V(:,index)=DeltaX(:,j);
            Neighbours_X(:,index)=X(:,j);
        end
    end

    %
    Separation%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Eq. (3.1)
    S=zeros(dim,1);
    if neighbours_no>1
        for k=1:neighbours_no
            S=S+(Neighbours_X(:,k)-X(:,i));
        end
        S=-S;
    else
        S=zeros(dim,1);
    end

    %
    Alignment%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Eq. (3.2)
    if neighbours_no>1

```

```

A=(sum(Neighbours_V')')/neighbours_no;
    else
        A=DeltaX(:,i);
    end

    %
Cohesion%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Eq. (3.3)
    if neighbours_no>1

C_temp=(sum(Neighbours_X')')/neighbours_no;
    else
        C_temp=X(:,i);
    end

    C=C_temp-X(:,i);

    % Attraction to
food%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Eq. (3.4)

Dist2Attraction=distance(X(:,i),Food_pos(:,1));
    if all(Dist2Attraction<=r)
        F=Food_pos-X(:,i);
        iter;
    else
        F=0;
    end

    % Distraction from
enemy%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Eq. (3.5)
    Dist=distance(X(:,i),Enemy_pos(:,1));
    if all(Dist<=r)
        E=Enemy_pos+X(:,i);
    else
        E=zeros(dim,1);
    end

```

```

end

for tt=1:dim
    if X(tt,i)>ub(tt)
        X(tt,i)=lb(tt);
        DeltaX(tt,i)=rand;
    end
    if X(tt,i)<lb(tt)
        X(tt,i)=ub(tt);
        DeltaX(tt,i)=rand;
    end
end
if any(Dist2Attraction>r)
    if neighbours_no>1
        for j=1:dim

DeltaX(j,i)=w*DeltaX(j,i)+rand*A(j,1)+rand*C(j,1
)+rand*S(j,1);
                if DeltaX(j,i)>V_max
                    DeltaX(j,i)=V_max;
                end
                if DeltaX(j,i)<-V_max
                    DeltaX(j,i)=-V_max;
                end
                X(j,i)=X(j,i)+DeltaX(j,i);
            end

        else

X(:,i)=X(:,i)+Levy(dim)'.*X(:,i);
            DeltaX(:,i)=0;
        end
    else
        for j=1:dim

DeltaX(j,i)=s*S(j,1)+a*A(j,1)+c*C(j,1)+f*F(j,1)+
e*E(j,1) + w*DeltaX(j,i);
                if DeltaX(j,i)>V_max
                    DeltaX(j,i)=V_max;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        if DeltaX(j,i)<=-V_max
            DeltaX(j,i)=-V_max;
        end
        X(j,i)=X(j,i)+DeltaX(j,i);
    end
end

Flag4ub=X(:,i)>ub';
Flag4lb=X(:,i)<lb';

X(:,i)=(X(:,i).*(~(Flag4ub+Flag4lb)))+ub'.*Flag4
ub+lb'.*Flag4lb;

end

    display(['At the iteration ', num2str(iter),
' there are ', num2str(Archive_member_no), '
non-dominated solutions in the archive']);
end

figure(1)

Draw_MT();

hold on
if obj_no==2

plot(Archive_F(:,1),Archive_F(:,2),'ko','MarkerS
ize',8,'markerfacecolor','k');
else

plot3(Archive_F(:,1),Archive_F(:,2),Archive_F(:,
3),'ko','MarkerSize',8,'markerfacecolor','k');
end
legend('True PF','Obtained PF');
title('MODA');

```

```

xlswrite('solusi.xls',Archive_X)
hold off
A=solusi(Archive_F,Archive_X);

figure(2)
subplot(2,2,1)
loglog(T,rhoobs,'or','linewidth',2);%,'LineWidth
',1)%'MarkerSize',3,'MarkerFaceColor','y');
hold on
plotRphase(T,Archive_X) %plot rho inverted
legend('observed','inverted');
hold on

% plot phase
subplot(2,2,3);
loglog(T,phaseobs,
'or','linewidth',2);%,'LineWidth',1)
hold on
plotRphase3(T,Archive_X) %plot phase inverted
legend('observed','inverted');
hold on

[DE,RH]=depthrho4(asli); %observasi
% plot depth rho
%plot observed
subplot(2,2,[2 4])
plot(RH,DE,'-or','linewidth',4);
ylabel('depth (m)')
xlabel('Apparent Resistivity (Ohm m)')
axis ij
hold on

[D R]=rataDR(Archive_X);
% plot rata rata
plot(R,D,'-*black','linewidth',3);
hold on

% plot semua solusi
plotHR(Archive_X); %semua solusi

```

```
hold on
legend('observed', 'mean', 'inverted');

r=mean(Archive_X);
ratasolusi=10.^r
```

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa data, pembahasan dan kajian teori yang dilakukan secara komprehensif, dapat ditarik kesimpulan yaitu algoritma multiobjektif *dragonfly* dapat digunakan untuk inversi magnetotellurik 1 dimensi baik pada data sintetik maupun data lapangan.

#### **5.2 Saran**

Dari hasil penulisan tugas akhir ini disarankan untuk dilakukan study lebih lanjut serta memodifikasi algoritma multi objektif *dragonfly* agar algoritma tersebut tidak terjebak pada minimum local atau menggunakan algoritma multi objektif lain yang tidak mudah terjebak pada minimum local seperti *multi objective difference algorithm* .

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

## DAFTAR PUSTAKA

- Dal Moro, G., 2010. Insights on surface wave dispersion and HVSR: Joint analysis via Pareto optimality. *Journal of Applied Geophysics* 72, 129–140. doi:10.1016/j.jappgeo.2010.08.004
- Dal Moro, G., 2008. VS and VP vertical profiling via joint inversion of Rayleigh waves and refraction travel times by means of bi-objective evolutionary algorithm. *Journal of Applied Geophysics* 66, 15–24. doi:10.1016/j.jappgeo.2008.08.002
- Giancarlo, D.M., 2010. Insights on surface wave dispersion and HVSR: Joint analysis via Pareto optimality. *Journal of Applied Geophysics* 72, 129–140. doi:10.1016 /j.jappgeo.2010.08.004
- Grandis, H., 2009. Pengantar Permodelan Inversi Geofisika. *Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI)*, Jakarta.
- Grandis, H., 1999. An alternative algorithm for one-dimensional magnetotelluric response calculation. *Computers and Geosciences* 25, 119–125. doi:10.1016/S0098-3004 (98) 00110-1
- Kadir, T.V.S., 2011. Metode magnetotelluric (MT) untuk eksplorasi panas bumi daerah Lili Sulawesi Barat dengan data pendukung metode gravitasi (Undergraduate Thesis). *Universitas Indonesia*, Jakarta.
- Lee, S.K., Kim, H.J., Song, Y., Lee, C.-K., 2009. MT2DInvMatlab—A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion. *Computers & Geosciences* 35, 1722–1734. doi: 10.1016 /j.cageo.2008.10.010
- Maulana, Y., 2010. Pemodelan Inversi Magnetotellurik Satu-Dimensi dengan Algoritma Particle Swarm Optimization

- (Undergraduate Thesis). Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Mirjalili, S., 2015. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural Comput & Applic* 1–21. doi:10.1007/s00521-015-1920-1
- Mirjalili, S., Lewis, A., 2015. Novel frameworks for creating robust multi-objective benchmark problems. *Information Sciences* 300, 158–192. doi:10.1016/j.ins.2014.12.037
- Mirjalili, S., Rawlins, T., Hettenhausen, J., Lewis, A., 2013. A comparison of multi-objective optimisation metaheuristics on the 2D airfoil design problem. *ANZIAM Journal* 54, 345–360.
- Ngatchou, P.N., Zarei, A., Fox, W.L.J., El-Sharkawi, M.A., 2008. Pareto Multiobjective Optimization, in: Chair, K.Y.L., El-Sharkawi, M.A. (Eds.), *Modern Heuristic Optimization Techniques*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 189–207.
- Sasaki, Y., 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *GEOPHYSICS* 54, 254–262. doi:10.1190/1.1442649
- Simpson, F., Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press.
- Sungkono, 2011. *Inversi Terpisah dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh dan Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Menggunakan Algoritma Genetik (Master Thesis)*.
- Wachisbu, M.I.M., Santosa, B.J., 2015. *Pemodelan Data Magnetotelurik Dengan Remote Reference Untuk Eksplorasi Cekungan Migas Studi Kasus: Lapangan EM-4*. *Jurnal Sains dan Seni ITS* 4, B17–B20.n.d.
- Unsworth, M. 2008. *Lecture Notes. Geophysics* 424

## BIODATA PENULIS



Pramudiana lahir di Banyuwangi, 10 oktober 1993, putri pertama dari dua bersaudara dari pasangan Samsul Hadi (46) dan Hemilia (43). Penulis menempuh pendidikan formal di TK Dharma Wanita (1998-2000), SDN 1 Kaliploso - Cluring Banyuwangi (2000-2006), SMP Negeri 1 Cluring Banyuwangi (2006-2009),

SMA Negeri 2 Genteng Banyuwangi (2009-2012), hingga Perguruan Tinggi Negeri S-1 Jurusan Fisika ITS angkatan 2012 melalui jalur Tulis. Selama menjalani perkuliahan, penulis pun aktif dalam bidang organisasi mahasiswa yaitu klub keilmiahan ITS 2014/2015 sebagai sekretaris. Selain itu, penulis juga menjadi Asisten Fisika Dasar 1 dan 2 Tahun Ajaran 2014-2015. Dengan adanya laporan Tugas Akhir ini, penulis berharap akan adanya pengembangan penelitian magnetotellurik 1 dimensi maupun algoritma *dragonfly*. Untuk keterangan lebih jelas mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui ***e-mail*** : **pramudyana28@gmail.com**