

Inversi Data Magnetotellurik 1 Dimensi Menggunakan Algoritma Multi-Objektif Dragonfly

Pramudiana, Sungkono, Bagus Jaya Santosa
Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: bjs@physics.its.ac.id

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.

I. PENDAHULUAN

Magnetotellurik merupakan metode pasif geofisika yang memanfaatkan medan magnet dan medan listrik alamiah bumi untuk mengetahui distribusi parameter fisis bawah permukaan. Pada magnetotellurik 1 dimensi (MT 1D), terdapat 8 asumsi dasar yaitu: 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 [1].

Dari persamaan Maxwell dan berbagai asumsi dasar tersebut, dapat diturunkan nilai impedansi seperti pada Persamaan (1) dibawah ini:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{i\omega\epsilon_0\rho} \quad (1)$$

dengan Z_{xy} merupakan impedansi, E_x merupakan medan listrik pada komponen x, H_y merupakan medan magnet pada komponen y, dan ρ adalah rapat muatan listrik (C/m^3).

Persamaan (1) dapat diturunkan menjadi resistivitas dan fasa (Persamaan 2 dan 3) yang merupakan data lapangan magnetotellurik[2].

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

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}Z_1}{\text{Re}Z_1} \right] \quad (3)$$

dengan Z_1 merupakan impedansi pada lapisan 1, Φ merupakan fasa, dan ρ merupakan resistivitas.

Nilai impedansi masing masing lapisan pada kasus MT 1D ditentukan oleh resistivitas yang bervariasi terhadap kedalaman, maka parameter model pada MT 1D berupa resistivitas dan ketebalan. Untuk mengetahui distribusi resistivitas MT 1D, dilakukan permodelan geofisika yaitu permodelan ke depan (*forward modelling*) dan permodelan ke belakang (*inversion modelling*). Yang keduanya sering kali dilakukan secara simultan untuk mengetahui nilai fitness pada permodelan yang telah dilakukan.

Permodelan ke depan MT 1D dilakukan dengan menggunakan algoritma rekursif seperti pada Persamaan (3). Algoritma rekursif sendiri mempunyai prinsip yaitu perhitungan nilai resistivitas dengan menggunakan dua lapisan yang berurutan sampai mendapatkan nilai resistivitas di permukaan [2].

$$Z_i = Z_{i0} \frac{1 - R_i \exp(-2k_i h_i)}{1 + R_i \exp(-2k_i h_i)} \quad (4)$$

$$\text{dengan: } R = \frac{Z_{0i} - Z_{i+1}}{Z_{0i} + Z_{i+1}}, \quad Z_{i0} = \sqrt{\frac{i2\pi\mu_0\rho_i}{T}}, \quad k_i = \frac{Z_{i0}}{\rho_i}$$

dimana Z merupakan impedansi, μ menotasikan permeabilitas magnetic (henry/m), ρ merupakan resistivitas (ohm.meter), sedangkan T merupakan perioda, dan h merupakan ketebalan lapisan (m).

Permodelan ke belakang MT 1D dilakukan 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 [2].

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 multi-objektif. Mengingat MT 1D mempunyai 2 variabel data lapangan yang berupa resistivitas dan fasa, sehingga pencarian pencarian solusi MT 1D dilakukan dengan meminimumkan ke dua variabel tersebut.

Untuk meminimumkan 2 variabel menggunakan objektif tunggal, memiliki solusi yang riskan terjebak pada minimum lokal [3]. 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 [4;5]. Oleh karena itu, proses inversi untuk meminimumkan dua variabel atau lebih, lebih baik menggunakan metode multi-objektif [4;5]. Salah satu metode multi-objektif untuk pencarian model ialah algoritma multi-objektif *dragonfly*.

Algoritma multi-objektif *dragonfly*. 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 PSO. Sehingga algoritma ini hanya didasarkan pada tingkah masing masing individu serta perilaku berkerumun tersebut. Algoritma multi-objektif *dragonfly* ini tergolong cepat dibandingkan dengan algoritma multi-objektif yang lain seperti NSGA II dan MOPSO [6].

Untuk itu, dalam penelitian ini, dilakukan inversi data magnetotellurik 1D menggunakan algoritma multi-objektif *dragonfly* [6] untuk meminimumkan dua fungsi objektif, yaitu error antara data pengukuran dan perhitungan untuk data phase dan resistivitas semu.

II. METODE

Secara garis besar, penelitian ini terbagi menjadi 3 tahapan. Yaitu permodelan ke depan, inversi data sintetik, dan inversi data lapangan.

1. Permodelan ke depan

Permodelan ini bertujuan untuk mendapatkan data sintetik dari parameter model sintetik dengan menggunakan rumus rekursif seperti pada Persamaan (1). Model yang digunakan berupa model 3 lapisan dan model 5 lapisan. Data sintetik yang didapat, digunakan untuk validasi software/inversi data sintetik.

2. Inversi data sintetik

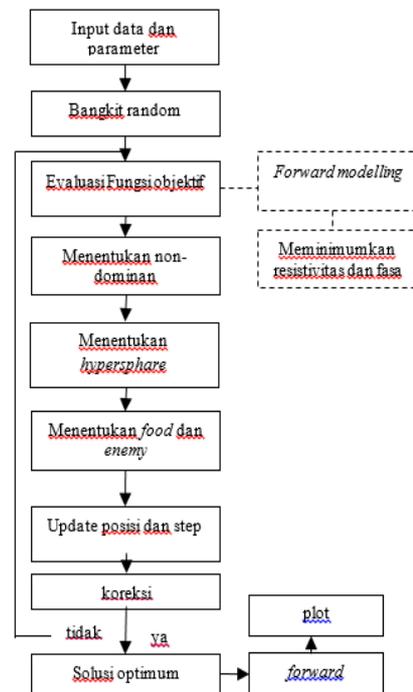
Inversi data sintetik bertujuan untuk mendapatkan kembali data sintetik seperti hasil permodelan kedepan. Inversi ini dilakukan dengan menggunakan algoritma multi-objektif *dragonfly* dengan fungsi objektif berupa resistivitas dan fasa. Rumus fungsi objektif yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan (2) dan (3).

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_f (\log_{10}(d_{obs}^\rho / d_{pred}^\rho))^2} \tag{5}$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_f (d_{obs}^\phi - d_{pred}^\phi)^2} \tag{6}$$

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

Solusi dari inversi ini berupa semua individu pada pareto front model. Diagram alir permodelan ke belakang dengan menggunakan algoritma multi-objektif *dragonfly* dapat dilihat seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Alir permodelan ke belakang menggunakan algoritma multi-objektif *dragonfly*

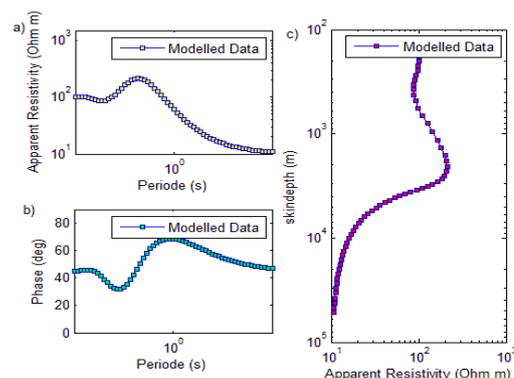
3. Inversi data lapangan

Inversi data lapangan merupakan pe-ngaplikasian software ke data sebenarnya. Data MT yang diinversi berupa data yang didapatkan dari model Sasaki. 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 2.1.

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Permodelan ke Depan

Permodelan ke depan bertujuan untuk mendapatkan data sintetik dari parameter model sintetik. Parameter model sintetik berupa lapisan resistif diantara lapisan konduktif. 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 3.1 Hasil permodelan ke depan MT 1D pada model 1 a) Kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) Kurva *phase* terhadap perioda, c) Model bawah permukaan.

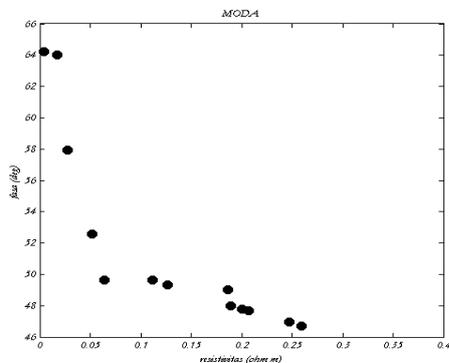
Gambar 3.1a dan 3.1b merupakan hasil permodelan ke depan pada model 1, yaitu lapisan resistif diantara lapisan konduktif. Setelah dilakukan permodelan ke depan kemudian dilakukan penggambaran antara resistivitas dan fasa terhadap perioda serta Gambar 3.1c merupakan gambar resistivitas semu terhadap kedalaman semu (*skindepth*). Gambar 3.1c menunjukkan bahwa pada bawah permukaan paling tidak ada 3 lapis batuan yang ditunjukkan dengan adanya nilai resistivitas $1 < \text{resistivitas } 2 > \text{resistivitas } 3$. Begitu pula dengan model 2, permodelan ke depan model 2 ini juga didapatkan data sintetik. Yang penggambaran dari model bawah permukaan hasil permodelan kedepan model 2 ini, digunakan sebagai acuan penentuan ruang pencarian model pada tahap inversi.

B. Inversi Data Sintetik

Inversi ini dilakukan dengan menggunakan data sintetik yang bertujuan untuk mendapatkan kembali parameter model tersebut. Setelah dilakukan permodelan ke belakang dengan menggunakan algoritma multiobjektif dragonfly, didapatkan hasil berupa pareto *front* model. Semua individu pada pareto *front* model dipilih sebagai kemungkinan solusi.

Pada inversi model 1 ini dilakukan pemilihan 100 individu dan 100 *archive* non-dominan serta dilakukan perulangan sebanyak 25 itrasi. 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.

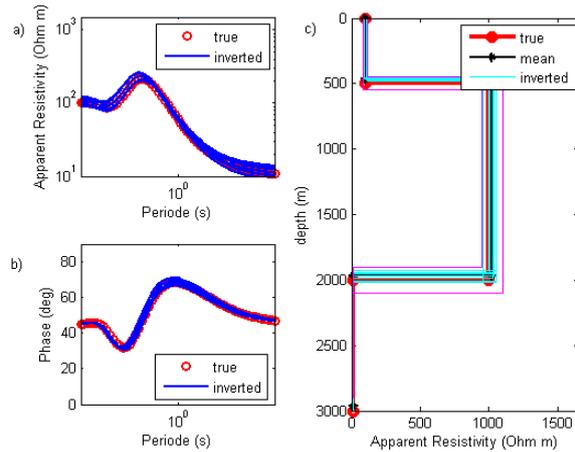
Penggambaran pareto *front* model dari hasil inversi model 1 dapat dilihat pada Gambar 4.6 dengan sumbu x merupakan nilai error dari resistivitas dan sumbu y merupakan nilai error dari fasa. Resistivitas mempunyai error yang kecil dengan kisaran 0-0.25 sedangkan fasa mempunyai error yang besar yaitu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



Gambar 3.2 Pareto front model hasil inversi model 1

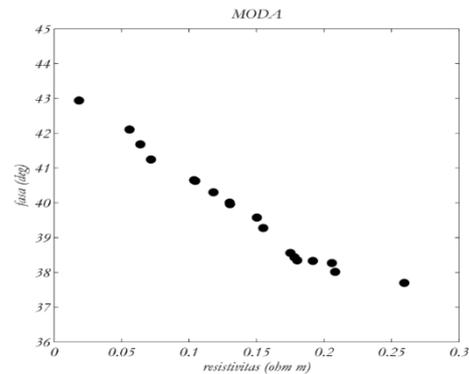
Gambar 3.3a dan 3.3b merupakan semua solusi yang mungkin dari inversi model 1 dengan warna merah merupakan *true data* dan warna biru merupakan data perhitungan. Gambar ini menunjukkan bahwa data perhitungan dan data sebenarnya sangat dekat. Gambar 3.3c merupakan perbandingan model yang sebenarnya dan model hasil inversi. Yang mana, kedua model ini

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



Gambar 3.3 Hasil inversi model 1 menggunakan parameter model 3 lapisan a) kurva *apparent esistivity* terhadapperioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

Inversi data sintetik juga dilakukan menggunakan pendekatan lapisan yang berbeda. Yaitu pendekatan 5 lapisan untuk menginversi model sintetik 3 lapisan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemilihan lapisan pada tahap inversi. Model yang diinversi berupa lapisan konduktif diantara lapisan resistif. *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 3.4c yang berupa warna pink. Model 2 ini diinversi menggunakan iterasi sebanyak 25 kali melalui populasi individu sebesar 100, serta maksimum *archive* sebanyak 100 individu.

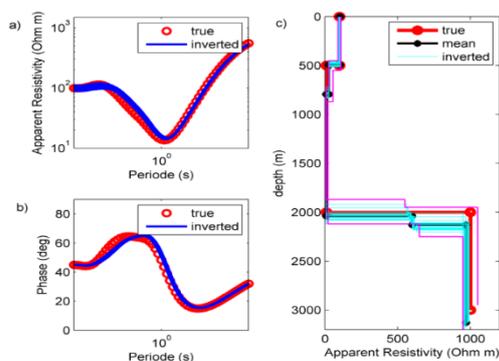


Gambar 3.4 Pareto *front* model hasil inversi dengan menggunakan pendekatan lapisan yang berbeda.

Pareto *front* model hasil inversi lapisan konduktif diantara lapisan resistif dengan menggunakan pendekatan 5 lapisan ini dapat dilihat sebagaimana Gambar 3.4. 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. Data fasa sering kali mempunyai kualitas yang kurang baik. Sehingga sering kali error fasa yang besar dapat ditolerir[2].

Gambar 3.5a dan 3.5b secara berurutan merupakan perbandingan antara data resistivitas semu dan fase

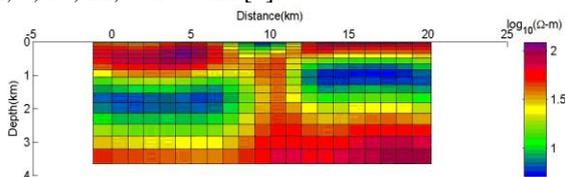
perhitungan (inverted) dan data observasi. Gambar ini menunjukkan bahwa data inversi atau perhitungan berhimpit (dekat atau mirip) dengan data perhitungan. Kemiripan ini juga terjadi pada model bawah permukaan sebenarnya dengan model bawah permukaan hasil inversi. Selain itu trend kurva hasil inversi dan juga data model tersebut juga tidak memberikan perbedaan yang signifikan walau diinversi dengan menggunakan pendekatan lapisan yang berbeda. Sehingga 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[2].



Gambar 3.5 Pareto front model inversi dengan pendekatan 5 lapisan a) kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

C. Inversi Data Lapangan

Inversi data lapangan dimaksudkan untuk menguji algoritma multi-objektif *dragonfly* pada data pengukuran. Data pengukuran yang digunakan yaitu data yang berasal dari model yang digunakan oleh [6]. Penampang 2D dari data [6] ini dapat dilihat seperti pada Gambar 4.11. Data 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 [6] 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 [7].



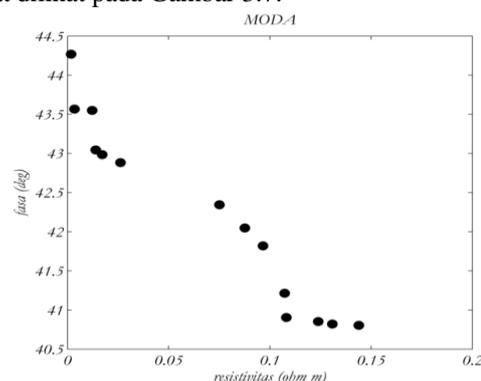
Gambar 3.6 Data lapangan yang mengacu pada data [6].

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*.

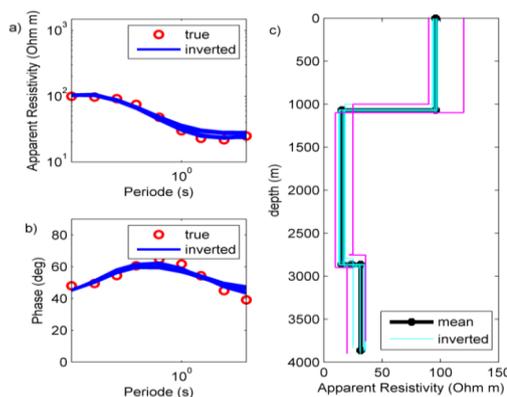
Berdasarkan nilai resistivitas pada masing-masing lapisan itulah digunakan *search space* sebagai berikut: ketebalan maksimum yaitu 1100, 1800, 5 meter, dan ketebalan minimum yaitu 1000, 1750, 0.1 meter, serta resistivitas maksimum yaitu 120, 15, 27.5, 36 ohm meter, sedangkan resistivitas minimum yaitu 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 3.7.



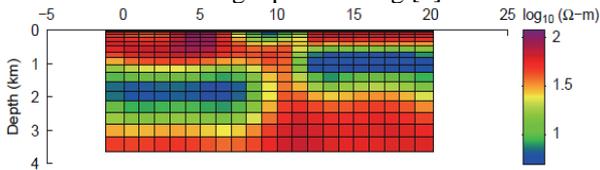
Gambar 3.7 Pareto front model inversi data [6]

Gambar 3.7 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 berkisar 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 dengan pernyataan bahwa kualitas data fasa tidaklah sebagus kualitas data resistivitas [2].



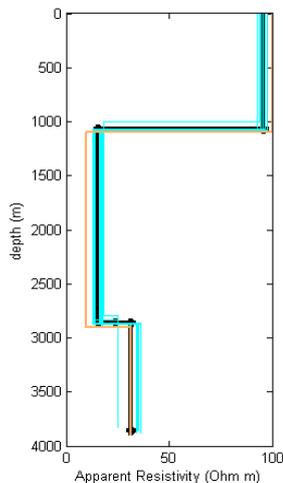
Gambar 3.8. Hasil inversi inversi data sasaki a) kurva *apparent resistivity* terhadap perioda, b) kurva *phase* terhadap perioda, c) model bawah permukaan.

Gambar 3.8a dan 3.8b merupakan penggambaran kemungkinan solusi dan data sebenarnya. Yang mana, data sebenarnya dan data perhitungan tampak berhimpit. Gambar 3.8c merupakan model bawah permukaan hasil inversi. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa, data [6] 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 dengan menggunakan software MT2DInvMatlab sebagai pembandingan [6].



Gambar 4.14. Hasil join inversi dari mode TE dan TM menggunakan MT2DInvMatlab.

Gambar 4.14 merupakan hasil inversi dengan menggunakan MT2DInvMatlab. 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 Multi-objektif dragonfly (warna cyan) dan hasil inversi Lee (2009).

Perbandingan hasil inversi data Sasaki pada stasiun 3 dengan menggunakan algoritma multi-objektif *dragonfly* dan hasil inversi menggunakan MT2DInvMatlab ini dinyatakan oleh Gambar 4.15. Berdasarkan penggambaran bawah permukaan kedua hasil inversi tersebut (Gambar 4.15), hasil inversi MT2DInvMatlab (warna orange) tampak berhimpit dengan beberapa individu dari kemungkinan solusi hasil inversi dengan menggunakan algoritma multi-objektif *dragonfly* (warna cyan). Walau ada individu-individu yang menyimpang. Hal tersebut mengindikasikan bahwa algoritma multi-objektif *dragonfly* ini dapat digunakan untuk mengestimasi resistivitas bawah permukaan data lapangan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa data, pembahasan dan kajian teori yang dilakukan secara komprehensif, dapat ditarik beberapa kesimpulan bahwa: Algoritma multiobjektif *Dragonfly* dapat digunakan untuk inversi Magnetotellurik 1Dimensi baik pada data sintetik maupun data lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Prof. Dr. rer. net. Bagus Jaya Santosa, S.U. dan Bapak Sungkono, M.Si. selaku dosen pembimbing dan semua pihak yang terlibat dalam penelitian tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Simpson, F., Bahr, K., 2005. Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press.
- [2] Grandis, H., 2009. Pengantar Permodelan Inversi Geofisika. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta.
- [3] Sungkono, 2011. Inversi Terpisah dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh dan Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Menggunakan Algoritma Genetik (Master Thesis).
- [4] 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