

IMPLEMENTASI ALGORITMA RR-PSO UNTUK INVERSI DISPERSI GELOMBANG RAYLEIGH DAN VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING

Dharma Arung Laby, Bagus Jaya Santosa, Sungkono
Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: bjs@physics.its.ac.id

Abstrak— Akhir-akhir ini, parameter fisis bawah permukaan seperti kecepatan gelombang geser (V_s) dan resistivitas (ρ) banyak dimanfaatkan untuk investigasi geoteknik dan studi lingkungan. Salah satunya, untuk karakterisasi dan monitoring tanggul. Inversi merupakan kunci utama dalam mengestimasi parameter V_s pada analisis dispersi gelombang Rayleigh dan ρ pada vertical electrical sounding (VES). Oleh karena itu, diperlukan algoritma inversi yang cepat, stabil dan robust terhadap noise serta mampu menyediakan informasi ketidakpastian dalam mengestimasi parameter tersebut. Pada penelitian ini, telah dikembangkan algoritma inversi berbasis RR-PSO untuk inversi kurva dispersi dan data VES. Pada penelitian ini dilakukan estimasi posterior untuk menentukan parameter model bawah permukaan baik pada inversi dispersi gelombang Rayleigh dan VES. Hasil penelitian ini melaporkan bahwa algoritma RR-PSO dapat digunakan untuk menginversi dispersi gelombang Rayleigh dan VES dengan baik. Ditambah lagi, dapat mengestimasi parameter bawah permukaan dengan akurat dan memiliki ketepatan solusi yang relatif kecil.

Kata Kunci— Kecepatan gelombang geser, resistivitas, dispersi gelombang Rayleigh, VES, RR-PSO, inversi.

I. PENDAHULUAN

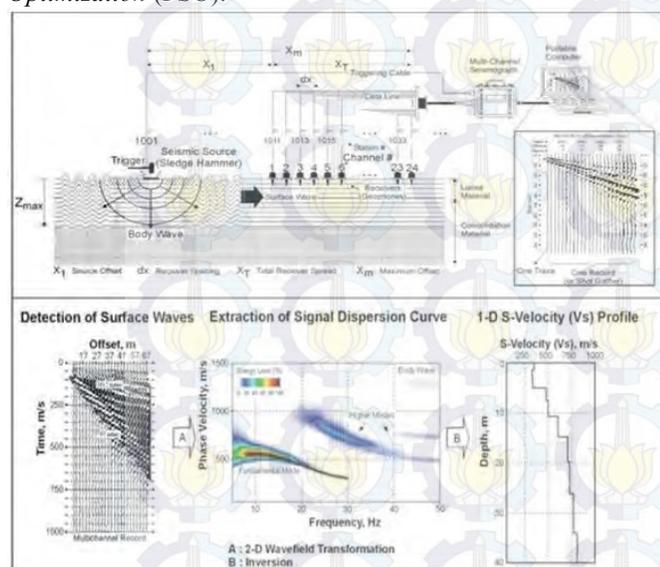
Akhir-akhir ini beberapa parameter fisis bawah permukaan seperti *shear-wave velocity* atau kecepatan gelombang geser (V_s) dan resistivitas (ρ) banyak digunakan oleh para peneliti untuk investigasi geoteknik dan studi lingkungan. Di antaranya untuk karakterisasi dan monitoring tanggul [1,2]. Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) merupakan representasi dari tingkat kekakuan dan karakteristik struktur bawah permukaan. Sedangkan nilai resistivitas (ρ) berhubungan dengan tingkat saturasi air atau lumpur dan keberadaan *fracture* pada lapisan bawah permukaan [3]. Sehingga, kedua parameter tersebut dapat memberikan informasi mengenai kondisi bawah permukaan dan sangat penting untuk diinvestigasi. Analisis dispersi gelombang Rayleigh dengan *Multi-channel Analysis of Surface Waves* (MASW) merupakan metode populer saat ini yang digunakan dalam investigasi V_s . Sementara, untuk investigasi ρ , *Vertical Electrical Sounding* (VES) merupakan metode yang paling sering digunakan karena relatif murah, mudah dan memberikan hasil yang cepat dengan resolusi spasial tinggi. Untuk memperoleh parameter

kecepatan gelombang geser (V_s) dan resistivitas (ρ) diperlukan metode inversi yang mampu mengestimasi nilai parameter model dengan akurat.

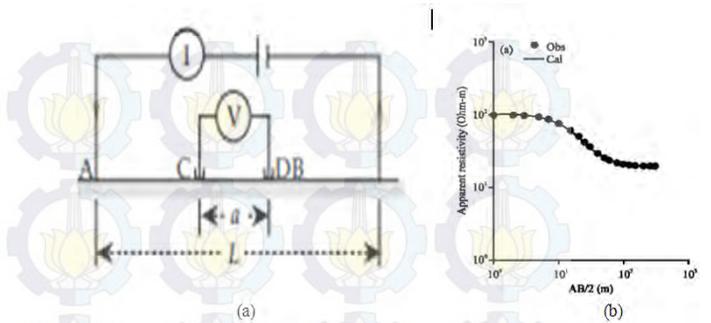
Gelombang Rayleigh pertama kali ditemukan keberadaannya oleh Lord Rayleigh pada tahun 1885, yang merupakan gelombang hasil interferensi dan menjalar secara efektif di sepanjang permukaan. Gelombang ini dihasilkan dari interaksi gelombang P dan SV saat naik dan turun. Superposisi antara gelombang P dan gelombang SV membentuk eliptisitas gelombang. Terbentuknya gerakan elips tersebut dikarenakan gerakan permukaan secara vertikal lebih besar daripada gerakan horizontalnya dengan perbandingan 1,5 [4]. Gelombang Rayleigh memiliki amplitudo yang semakin berkurang secara eksponensial seiring dengan bertambahnya kedalaman [5]. Di samping itu, gelombang ini mengalami dispersi ketika melalui medium berlapis yang mana frekuensi gelombang yang lebih rendah akan mencapai lapisan yang lebih dalam dibandingkan dengan gelombang yang berfrekuensi lebih tinggi. Artinya gelombang dengan frekuensi tinggi hanya mencapai lapisan yang dekat dengan permukaan. Sifat dispersif dari gelombang Rayleigh ini dapat digunakan untuk mengkarakterisasi lapisan tanah berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) yang merepresentasikan tingkat kekakuan (*stiffness*) dinamik dari suatu material [5–7]. *Vertical Electrical Sounding* atau yang sering disebut VES merupakan salah satu metode resistivitas yang bertujuan untuk mengamati variasi nilai resistivitas terhadap kedalaman (resistivitas satu dimensi/ *electric stratigraphy*). Teknik ini sangat baik digunakan untuk mengukur resistivitas setiap kedalaman pada struktur datar dan berlapis, seperti per lapisan sedimen atau kedalaman air tanah. Konfigurasi elektroda yang digunakan pada VES ini adalah konfigurasi Schlumberger. Titik tengah atau datum pengukuran selalu berada pada posisi tetap sementara jarak antar elektroda semakin bertambah. Hal ini menyebabkan arus yang mengalami penetrasi ke lapisan yang lebih dalam sangat bergantung pada distribusi resistivitas secara vertikal [6].

Pengukuran menggunakan metode-metode geofisika seperti analisis dispersi gelombang Rayleigh dengan MASW dan VES dilakukan untuk memperkirakan kondisi bawah permukaan bumi. Data hasil pengukuran merupakan respon

dari keadaan bawah permukaan yang timbul dari variasi sifat fisis seperti densitas, resistivitas, cepat rambat gelombang elastik yang berasosiasi dengan keadaan (geologi) bawah permukaan. Untuk menyajikan distribusi data geofisika agar permasalahan menjadi lebih sederhana dan mempermudah dalam perhitungan digunakan pemodelan. Grandis (2009), menjelaskan bahwa model dalam geofisika adalah obyek yang menyatakan parameter fisis yang bervariasi terhadap posisi (variasi spasial). Lebih jauh model dapat dinyatakan oleh parameter model yang terdiri dari parameter fisis dan geometri yang menggambarkan distribusi spasial parameter fisis tersebut. Hubungan antara respon model dengan parameter model bawah permukaan dinyatakan oleh persamaan matematis yang diturunkan dari konsep-konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau. Salah satu tujuan utama inversi ialah mencari nilai minimum dari fungsi obyektif yang merupakan selisih antara data pengamatan dengan data teoritis. Pada kasus ini, inversi biasa dilakukan untuk menginversi kurva dispersi gelombang Rayleigh dan VES secara terpisah. Untuk mendapatkan solusi yang optimum maka fungsi tersebut harus dioptimasi. Optimasi tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan lokal seperti menggunakan metode least-square dan Singular Value Decomposition (SVD). Namun metode ini memiliki kelemahan yaitu mudah terjebak pada minimum lokal (fungsi obyektif kurva dispersi dan VES memiliki banyak minimum lokal) dan kebergantungan solusi akhir terhadap tebakan awal yang diberikan [8]. Sehingga diperlukan metode optimasi global yang dapat mencapai solusi optimum yang mana solusi tersebut berada pada minimum global. Ditambah lagi metode optimasi global tidak membutuhkan tebakan awal, namun menggunakan pencarian ruang sampling yang luas untuk mengestimasi minimum global fungsi obyektif. Salah satu metode optimasi global yang telah banyak digunakan dalam permasalahan inversi geofisika ialah *Particle Swarm Optimization* (PSO).



Gambar 1. Tahapan dalam analisis dispersi gelombang Rayleigh dengan MASW (www.cflhd.gov)



Gambar 2. (a) Konfigurasi elektroda Schlumberger di mana jarak elektroda C dan D adalah a dan jarak elektroda A-C dan D-B adalah sama; (b) Kurva resistivitas semu hasil pemodelan ke depan data VES yang dibentuk..

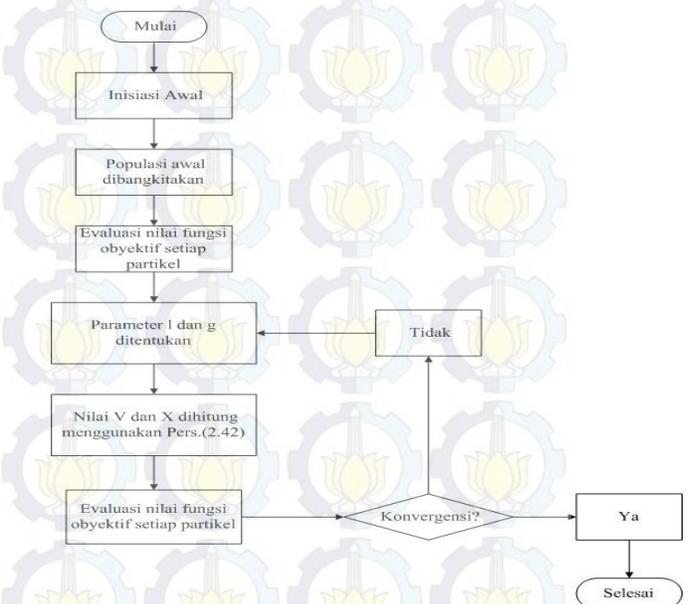
Baru-baru ini juga diperkenalkan berbagai versi dari algoritma PSO, salah satunya ialah regressive-regressive PSO (RR-PSO) [9]. Yang dapat dituliskan:

$$V(t + \Delta t) = (1 - (1 - \omega)\Delta t)V(t) + \phi_1 \Delta t (g(t) - X(t)) + \phi_2 \Delta t (l(t) - X(t))$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V(t + \Delta t) \tag{1}$$

RR-PSO memiliki tingkat konvergensi tertinggi di antara semua versi PSO dan perhitungan parameter yang mudah. Dalam inversi, dibutuhkan algoritma yang cepat dalam melakukan pencarian minimum global dan stabil agar dapat mendapat parameter bawah permukaan dengan akurat dan efisien. Untuk itu pada penelitian ini dikembangkan algoritma inversi dispersi gelombang Rayleigh dan VES berbasis RR-PSO.

II. METODE PENELITIAN



Gambar.3 Diagram alir algoritma RR-PSO

RR-PSO merupakan salah satu versi PSO, di mana setiap versi PSO memiliki langkah yang sama dalam mengoptimasi suatu fungsi. Khususnya fungsi obyektif pada permasalahan inversi dispersi gelombang Rayleigh dan VES.

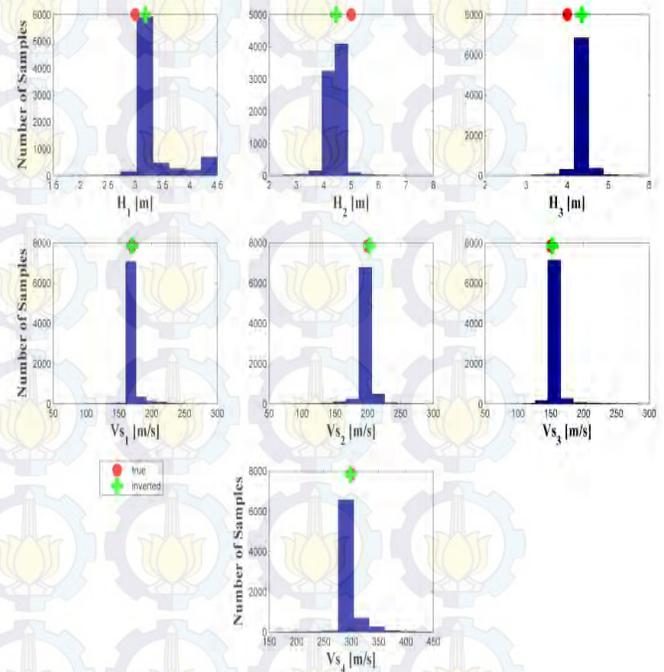
1. Dilakukan inialisasi awal yaitu menentukan banyak partikel dan iterasi yang digunakan dalam optimasi. Pada penelitian ini digunakan 200 partikel dan 100 iterasi. Pada tahap ini ditentukan juga *range* pencarian untuk mencari nilai X , yaitu $X_{min} \leq X \leq X_{max}$ dengan vektor X merupakan posterior yang berisi kumpulan solusi inversi.
2. Populasi awal X dibangkitkan dari *range* pencarian secara random sehingga diperoleh populasi awal $X_1^0, X_2^0, X_3^0, \dots, X_j^i, i = \text{iterasi}, j = \text{partikel ke} - n; n = 1, 2, 3, \dots, 200$. Dan nilai V diset nol menjadi $V_1^0 = V_2^0 = V_3^0 = \dots = V_{100}^0 = 0$. Ini diset sebagai iterasi pertama.
3. Dilakukan evaluasi fungsi obyektif dari setiap partikel yang dibangkitkan secara random sehingga diperoleh nilai fungsi obyektif $f[X_1^0], f[X_2^0], f[X_3^0], \dots, f[X_{200}^0]$.
4. Dilakukan penentuan parameter l dan g . l merupakan posisi terbaik masing-masing partikel sejauh iterasi yang telah dilakukan. Sementara g adalah posisi terbaik yang dapat dicapai partikel dalam kelompok. Indikator terbaik dilihat dari nilai evaluasi fungsi obyektifnya, di mana posisi terbaik ketika nilai f minimum.
5. Nilai V dan X diupdate menggunakan algoritma RR-PSO pada Pers.(2.42). Sehingga nilai V yang diperoleh $V_1^1, V_2^1, V_3^1, \dots, V_{200}^1$ dan X yang didapat dinyatakan dalam vektor $X_1^1, X_2^1, X_3^1, \dots, X_{200}^1$. Ini diset sebagai iterasi pertama.
6. Dilakukan evaluasi fungsi obyektif menggunakan nilai X yang telah diupdate dan diperoleh $f[X_1^1], f[X_2^1], f[X_3^1], \dots, f[X_{200}^1]$. Selanjutnya dilakukan pengulangan langkah ke empat dan seterusnya. Pengulangan ini dilakukan sebanyak iterasi yang telah ditentukan di awal yaitu 100.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Inversi Dispersi Gelombang Rayleigh

Inversi kurva dispersi menggunakan algoritma RR-PSO diimplementasikan pada permasalahan inversi kurva dispersi terlebih dahulu. Inversi ini dilakukan dengan mengestimasi posterior model pada search space yang telah ditentukan. Setelah posterior model diperoleh maka dilakukan penebakan

parameter model. Penebakan parameter dapat dilakukan dengan menggunakan nilai mean, median atau modus dari posterior [9]. Menurut studi Gonzales and Ottenbacher (2001) serta Manikandan (2011), jika menebak menggunakan mean maka keberadaan data yang menyimpang (outliers) dari tren posterior menyebabkan tebakan menjauh dari nilai sebenarnya. Jika menebak dengan menggunakan modus, data yang dilibatkan sangat sedikit sehingga hasil tebakan belum dapat mewakili semua posterior. Ditambah lagi, tidak semua data memiliki modus tunggal bahkan ada yang tidak memilikinya. Sedangkan nilai median selalu berada di antara mean dan modus. Lebih jauh, median tidak terpengaruh oleh keberadaan outliers sehingga dapat dikatakan memiliki nilai paling dekat dengan nilai sebenarnya. Maka pada penelitian ini digunakan median posterior untuk menebak parameter model. Sehingga dapat dikatakan median posterior mewakili model terbaik yang diperoleh dari inversi. Hasil estimasi distribusi posterior dengan inversi RR-PSO pada data sintetik model I dan II masing-masing ditampilkan pada Gambar 4. Distribusi posterior sangat terkonsentrasi pada suatu nilai. Dalam statistik, distribusi data yang terkonsentrasi atau semakin sempit menunjukkan proses tersebut stabil, dapat diprediksi dan memiliki kualitas data yang baik. Sedangkan, apabila distribusi data semakin melebar ke kanan atau ke kiri maka semakin tidak stabil, sulit untuk diprediksi dan memiliki kualitas buruk. Jika dikaitkan dengan proses inversi, maka semakin terkonsentrasi distribusi suatu posterior maka proses inversi tersebut stabil dan memiliki ketidakpastian yang kecil. Begitupula sebaliknya, semakin melebar ke kanan atau ke kiri distribusi posterior maka proses inversi tersebut semakin tidak stabil dan memiliki ketidakpastian yang besar. Pada inversi ini tentu dapat diprediksi dengan baik dan memiliki ketidakpastian yang sangat kecil.

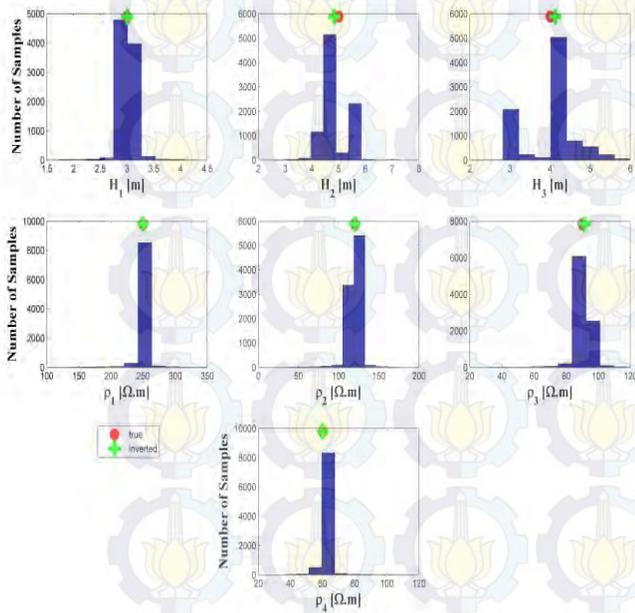


Gambar.4 Hasil estimasi posterior pada inversi dispersi gelombang Rayleigh

Pada Gambar.4 tersebut dilakukan penggambaran nilai parameter model sebenarnya dan median posterior yang mewakili model terbaik yang diperoleh pada proses inversi. Tujuan dari penggambaran ini untuk mengetahui seberapa dekat hasil tebakan dengan nilai sebenarnya. Nilai parameter sebenarnya disimbolkan dengan ‘o’ berwarna merah sedangkan hasil tebakan model terbaik disimbolkan dengan ‘+’ berwarna hijau. Dari hasil penggambaran tersebut terlihat nilai tebakan parameter sangat dekat dengan nilai sebenarnya. Nilai sebenarnya berada pada nilai parameter dengan jumlah sampel terbanyak, sehingga tebakan parameter yang diberikan cukup akurat.

B. Inversi Data VES

Pada inversi data VES menggunakan algoritma RR-PSO dilakukan prosedur yang sama dengan inversi kurva dispersi sebelumnya. Hasil inversi data VES diperlihatkan pada Gambar.5. Distribusi posterior menunjukkan bahwa terkonsentrasi pada suatu nilai sehingga proses inversi dikatakan stabil dan dapat diprediksi. Dengan demikian, penebakan parameter model yang dilakukan cukup akurat seperti yang ditunjukkan gambar. Dengan parameter tebakan (‘+’ berwarna hijau) sangat dekat dengan nilai parameter sebenarnya (‘o’ berwarna merah).



Gambar. 5 Hasil estimasi posterior pada inversi VES

Dengan demikian, dapat diketahui bahwa algoritma RR-PSO dapat diimplementasikan baik pada inversi dispersi gelombang Rayleigh dan VES.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa algoritma RR-PSO dapat diimplementasikan pada inversi dispersi gelombang Rayleigh dan Vertical Electrical Sounding (VES). Ditambah lagi , algoritma ini mampu menebak parameter dengan akurat dengan ketidakpastian solusi yang dihasilkan relatif kecil. Hal

ini dapat dilihat dari distribusi posteriornya yang sangat terkonsentrasi pada rentang nilai tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. rer.nat Bagus Jaya Santosa dan Sungkono selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, kritik dan saran sehingga makalah ini dapat diselesaikan. Serta, anggota laboratorium Fisika Bumi Jurusan Fisika ITS atas kerja sama dan bantuan yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Widyaningrum, Sungkono, A. Husein, B. J. Santosa, and A. S. Bahri, “Combination of Active and Passive Seismic Analyses for Embankment Characterization,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 771, pp. 179–182, Jul. 2015.
- [2] A. Husein, B. J. Santosa, and A. S. Bahri, “Seepage Monitoring of an Embankment Dam Using Resistivity Method: A Case Study of LUSI Mud Volcano P.79 - P.82 Embankment,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 771, pp. 213–217, Jul. 2015.
- [3] V. K. Karastathis, P. N. Karmis, G. Drakatos, and G. Stavrakakis, “Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams. Application at the Marathon Dam,” *J. Appl. Geophys.*, vol. 50, no. 3, pp. 247–260, Jun. 2002.
- [4] T. Lay and T. C. Wallace, *Modern Global Seismology, Volume 58*, 1 edition. San Diego: Academic Press, 1995.
- [5] G. Dal Moro, *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*, vol. 1. Elsevier Inc, 2014.
- [6] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*, 2 edition. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007.
- [7] S. Foti, C. G. Lai, G. J. Rix, and C. Strobbia, *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*, 1 edition. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [8] H. Grandis, *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), 2009.
- [9] Sungkono and B. J. Santosa, “Differential evolution adaptive metropolis sampling method to provide model uncertainty and model selection criteria to determine optimal model for Rayleigh wave dispersion,” *Arab. J. Geosci.*, pp. 1–21, Dec. 2014.