

ARTIKEL RISET

Kajian Inversi Tomografi Seismik Refraksi Menggunakan Kode PROFIT

Diva Alfiansyah* and Eddy Hartantyo

Ringkasan

Metode seismik refraksi merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan dalam kajian geofisika dekat permukaan. Metode ini masih memiliki ambiguitas dalam penggambaran model kecepatan bawah permukaan, terutama untuk model geologi yang kompleks dan kasus *low velocity layer*. Pemodelan dengan inversi tomografi pada metode seismik refraksi dapat digunakan sebagai solusi. PROFIT (*Profile Forward and Inverse Tomographic modelling*) telah dikembangkan dengan kombinasi inversi dan *forward modelling* tomografi 2D yang dapat diaplikasikan pada data seismik aktif di laut dan di darat dengan kondisi geologis yang kompleks. Pada penelitian ini, kode PROFIT digunakan untuk pemodelan maju (*forward modelling*) dan pemodelan balik data sintetik dengan fitur *low velocity layer*, yaitu model goa dan model intrusi. Posisi goa sintetik dapat direkonstruksi cukup baik yaitu pada jarak 160 m hingga 270 m dari bagian awal lintasan dan elevasi 80 m hingga 30 m, namun nilai kecepatan yang dihasilkan berbeda dengan model sintetiknya, yaitu 1,2 *km/s* sampai 1,6 *km/s*. Pada model intrusi, tubuh intrusi batuan tipe *dyke* dapat direkonstruksi cukup baik yaitu pada jarak 250 m hingga 500 m dari bagian awal lintasan dengan elevasi 170 m serta memiliki kecepatan yang sama dengan model sintetik yaitu 4 *km/s*. Setengah tubuh intrusi tipe *sill* dapat direkonstruksi pada posisi yang cukup tepat yaitu pada jarak 1100 m sampai 1350 m dengan elevasi 90 m dan kecepatan yang tepat yaitu 4 *km/s*. Hasil inversi tomografi menggunakan PROFIT sangat dipengaruhi oleh rentang kecepatan model awal dan nilai *SM* (*Smoothing Matrix*) dan *AM* (*Amplitude Matrix*).

Kata Kunci : seismik refraksi; PROFIT; *low velocity layer*; pemodelan maju; inversi; tomografi.

Abstract

Seismic refraction method is one of the geophysical methods used in near surface geophysics studies. This method still has ambiguity in describing the subsurface velocity model, especially for complex geological models and cases of low velocity layer. Tomographic inversion on the seismic refraction method can be used as a solution. PROFIT (Forward and Inverse Tomographic Modelling) has been developed with a combination of inversion and forward modelling 2D tomography which can be applied to active seismic data on the sea and on land with complex geological conditions. In this study PROFIT code is used for forward modelling and inverse modelling synthetic data with low velocity layer features, namely cave models and intrusion models. The position of synthetic caves can be reconstructed quite well at a distance of 160 m to 270 m from the beginning of line and elevations of 80 m to 30 m. But the velocity value produced is different from the synthetic model, which is 1.2 km/s to 1.6 km/s. In the intrusion model, the intrusion body type dyke can be reconstructed quite well, namely at a distance of 250 m to 500 m from the beginning of line with an elevation of 170 m and has the same velocity as the synthetic model of 4 km/s. Half the body intrusion type still can be reconstructed in a sufficiently precise position, namely at a distance of 1100 m to 1350 m with an elevation of 90 m, and the right speed is also 4 km/s. Tomographic inversion results using PROFIT are strongly influenced by the initial model velocity range and the value of SM (Smoothing Matrix) and AM (Amplitude Matrix)

Keywords: refraction seismic; PROFIT; low velocity layer; forward modelling; inversion; tomography.

*Correspondence: diva.alfiansyah@mail.ugm.ac.id

Laboratorium Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

†Equal contributor

PENDAHULUAN

Metode seismik refraksi merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan dalam kajian geofisika dekat permukaan atau *near surface geophysics*. Beberapa metode untuk mengolah data hingga menghasilkan model kecepatan bawah permukaan berdasarkan waktu tiba gelombang refraksi telah dikembangkan oleh para saintis. Metode tersebut antara lain metode ABC, hagerdoorn (plus minus), hagiwara, masuda, dan GRM (*generalized reciprocal method*). Metode ini menggunakan asumsi bahwa semakin bertambah kedalaman, lapisan batuan semakin kompak dan kecepatan gelombang juga semakin bertambah (Sismanto, 2016)[10]. Khalil dan Hanfy (2008)[4] menunjukkan mengolah data seismik refraksi menggunakan GRM untuk pemetaan *bedrock*. Dalam penentuan *bedrock* metode ini masih cukup efektif. Namun, metode-metode tersebut masih memiliki ambiguitas, yaitu satu data waktu tiba gelombang dapat menghasilkan banyak model kecepatan. Ambiguitas sering ditemui ketika menemui kasus *low velocity layer* (Sjogren, 2013)[8]. Hal lain yang menarik perhatian ahli geofisika dekat permukaan adalah, langkah interpretasi petrofisikal yang memberikan korelasi dari data geofisika ke sifat geologis dari bawah permukaan (Everett, 2013)[1]. Oleh karena itu, dibutuhkan metode pengolahan yang dapat menggambarkan kondisi geologis yang kompleks. Kompleks pada kajian ini adalah lapisan batuan yang semakin dalam semakin kompak diterobos oleh intrusi batuan beku atau mengalami patahan atau proses geologi yang lain.

Pemodelan dengan inversi tomografi pada metode seismik refraksi dapat digunakan sebagai solusi. Koulakov dkk. (2010)[6] menyebutkan, pada akhir dekade ini, beberapa pendekatan tomografi telah dikembangkan untuk sumber aktif [Hole, 1992[3]; Zelt dan Barton, 1998[12]; Korenaga, dkk 2000[5]; Hobro dkk 2003[2]]. Koulakov dkk. (2010)[6] mengembangkan sebuah teknik pendekatan baru yang dinamakan PROFIT (*Profile Forward and Inverse Tomographic Modelling*) dengan kombinasi inversi tomografi 2D dan *forward modelling* yang dapat diaplikasikan pada data seismik aktif di laut dan di darat. Ide ini bermula dari metode *bending ray tracing* yang dikembangkan oleh Um dan Thurber tahun 1987[11] untuk tomografi gempa bumi lokal dan Korenaga, dkk. tahun 2000[5]. Kode PROFIT memudahkan kita untuk membuat model tebakan awal yang kompleks sebagai masukan untuk *forward modelling* dan inversi. Salah satu hasil inversi tomografi menggunakan PROFIT ini dapat merekonstruksi *low velocity layer* yang berada di bawah tubuh intrusi batuan beku. Hal tersebut menunjukkan bahwa inversi tomografi seismik dapat memetakan kondisi bawah permukaan yang kompleks.

Pada penelitian ini kode PROFIT akan digunakan untuk pemodelan maju atau *forward modelling* dan pemodelan balik atau *inverse modelling*. Pemodelan maju terlebih dahulu dilakukan untuk uji *software* menggunakan model sintetik khususnya untuk kasus *low velocity layer*, yang penulis buat sendiri (model goa dan model intrusi). Kemudian dilakukan uji kode PROFIT untuk inversi tomografi dengan data sintetik yang dihasilkan dari *forward modelling* model sintetik. Diharapkan pemodelan ini dapat mengetahui kemampuan kode PROFIT dalam memetakan keberadaan *low velocity layer* pada dua kasus model sintetik yang telah dibuat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan pemodelan maju atau *forward modelling*, kemudian dilanjutkan dengan inversi tomografi. Pemodelan maju dilakukan dengan membuat dua model kecepatan sintetik dengan kasus *low velocity layer* dan intrusi batuan beku yang menerobos perlapisan. Model sintetik yang pertama adalah model goa dengan adanya *low velocity layer* (kecepatan sama dengan kecepatan udara, yaitu 300 m/s) di antara sepuluh lapisan batuan yang memiliki ketebalan masing-masing 10 m, ditunjukkan pada Gambar ???. Model sintetik yang kedua merupakan model geologi yang cukup kompleks, yaitu berupa empat lapisan batuan yang diterobos intrusi batuan beku (dengan kecepatan 4 - 4,2 km/s) secara horizontal dan vertikal, ditunjukkan pada Gambar 2. Lapisan pertama memiliki ketebalan 10 - 15 m, lapisan kedua dan ketiga memiliki ketebalan 60 - 70 m, dan lapisan terakhir memiliki ketebalan tak hingga. Dari pemodelan maju ini diperoleh *ray* sintetik dan waktu penjalaran gelombang sintetik dari proses *ray tracing* model 2D yang akan digunakan sebagai data pada tahap uji validasi kode PROFIT.

Koulakov dkk. (2010)[6] menyebutkan bahwa *ray tracing* atau penelusuran jalur sinar pada PROFIT menggunakan prinsip fermat yaitu mencari jalur penjalaran gelombang dengan waktu jalur minimal antara sumber dan penerima. Koulakov dkk. (2010)[6] membuat versi baru dari metode *bending*. Diawali dengan garis lurus antara sumber dan penerima, kemudian diubah untuk mendapatkan waktu tempuh minimum. Pada pendekatan pertama, simpangan A sehubungan dengan lintasan lurus awal dihitung berdasarkan persamaan

$$A = B \cos \left(\pi \frac{s - \frac{D_{tot}}{2}}{D_{tot}} \right) \quad (1)$$

dengan B adalah nilai bending, s adalah jarak pada jalur awal, D_{tot} adalah total panjang jalur awal

antara sumber dan penerima. Nilai B disesuaikan untuk mendapatkan kurva γ_B yang memberikan nilai integral minimum dari

$$t = \int_{\gamma_B} \frac{ds}{V(s)} = \int_{\gamma_B} S(s) ds \quad (2)$$

dengan $V(s)$ adalah distribusi kecepatan sepanjang ray atau sinar, ds adalah dstep. Nilai B bervariasi dari maksimal ke minimum, $S(s)$ adalah *slowness* atau kelambatan yang merupakan kebalikan dari nilai kecepatan.

ada tahap selanjutnya, simpangan yang lebih jauh dari jalur antara sumber dan penerima dilakukan secara iteratif dengan Persamaan 3.

$$A = \frac{B}{2} \cos \left(2\pi \frac{s - \frac{S_1 - S_2}{2}}{(S_1 - S_2)} \right) + \frac{1}{2} \quad (3)$$

dengan S_1 dan S_2 sesuai dengan panjang di sepanjang jalur di awal dan akhir segmen. Pada iterasi pertama, *bending* dilakukan untuk seluruh segmen dengan pendekatan pertama, namun menggunakan persamaan 3. Iterasi kedua, jalur dibagi menjadi dua segmen dengan panjang sama dan masing-masing dihitung dengan persamaan 3. Setelah menentukan waktu minimum, seluruh jalur dibagi menjadi tiga segmen. Kemudian prosedur ini berulang untuk jalur yang dibagi jadi 4,5 atau lebih segmen. *Bending* berakhir ketika panjang section menjadi lebih kecil dari nilai segmen minimum yang kita tentukan.

Data waktu penjaralan gelombang dari model sintetik yang telah dibuat kemudian digunakan pada tahap inversi tomografi. Tahap ini merupakan kelanjutan dari perhitungan matriks turunan pertama yang dilakukan dengan menggunakan jalur sinar yang dihitung berdasarkan *ray tracing* dalam model 2D yang telah dijelaskan. Setiap elemen dari matriks

$$A_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial V_j} \quad (4)$$

sama dengan deviasi waktu sepanjang sinar $ke-i$ yang dihasilkan dari perubahan kecepatan dalam nodes $ke-j$. Elemen-elemen dari matriks ini dihitung secara numerik.

Inversi dari matriks A yang *overdetermined* dengan vektor data tidak stabil pada awalnya. Oleh karena itu, inversi ini harus diatur atau diregularisasi dengan menambahkan dua matriks blok:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ A & M & \mathbf{I} \\ S & M & \mathbf{C} \end{bmatrix} dV = \begin{bmatrix} dT \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

dengan \mathbf{A} adalah matriks utama turunan pertama, dV adalah parameter model kecepatan yang akan dicari, dT adalah vektor data, AM adalah *Amplitude Matrix* (nilai skalar), \mathbf{I} adalah matriks identitas diagonal (dengan hanya satu elemen di setiap baris) yang mengontrol solusi amplitudo, SM adalah *Smoothing Matrix* (nilai skalar) dan \mathbf{C} adalah blok matriks yang mengontrol solusi *smoothing*. Setiap baris blok ini terdiri dari dua elemen bukan nol 1 dan -1 yang sesuai dengan semua kombinasi *nodes* di sekitarnya. Vektor data pada kedua blok ini bernilai nol, seperti yang ditunjukkan persamaan 5.

Mengubah nilai amplitudo redaman AM dan *smoothing* redaman SM mengontrol amplitudo dan kehalusan anomali yang diturunkan. Peningkatan nilai pada AM menyebabkan berkurangnya amplitudo dari anomali kecepatan yang diturunkan. Sedangkan peningkatan nilai SM menyebabkan berkurangnya perbedaan antar solusi pada *nodes* di sekitarnya (Koulakov, dkk. 2010)[6]. Inversi pada seluruh matriks \mathbf{A} dihitung menggunakan algoritma LSQR secara iterasi [Paige dan Saunders,1982[7]; Van der Sluis dan van der Vorst,1987 dalam (Koulakov, dkk. 2010)[6]].

Sebelum dilakukan inversi tomografi, terlebih dahulu dilakukan pengkajian parameter model tebakan awal dan parameter *damping* (SM dan AM) agar diperoleh hasil yang mendekati model sintetik tersebut. Proses yang dilakukan adalah dengan *trial and error* dalam penentuan rentang kecepatan pada nilai SM dan AM yang digunakan. Model tebakan awal untuk *trial and error* model goa terdiri dari tiga model awal dengan rentang kecepatan berbeda. Model tebakan awal I mulai pada rentang 0,3 hingga 3,5 km/s. Model tebakan awal II mulai pada rentang 0,5 hingga 3,5 km/s. Model tebakan awal III mulai pada rentang 1 hingga 3,5 km/s. Schon (2011)[9] menjelaskan bahwa rentang kecepatan batuan beku adalah 4 hingga 6 km/s, sehingga rentang kecepatan model tebakan awal untuk *trial and error* model intrusi batuan beku ditentukan berdasarkan rentang nilai ini. Model tebakan awal I untuk model intrusi memiliki rentang kecepatan 1 hingga 4 km/s. Model tebakan awal II untuk model intrusi memiliki rentang kecepatan 1 hingga 6 km/s. Berbeda dengan *trial and error* nilai SM dan AM tidak ditentukan jumlahnya dan akan berhenti ketika menemukan parameter paling cocok. Model kecepatan gelombang P bawah permukaan yang dihasilkan dari inversi tomografi menggunakan PROFIT, kemudian dibandingkan dengan model sintetik yang telah dibuat. Jika model kecepatan hasil inversi sudah mendekati model sintetik, maka menunjukkan bahwa parameter yang dimasukkan pada kode PROFIT sudah tepat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Model Goa

Model sintetik goa dengan lapisan batuan berlapis-lapis (sepuluh lapisan) dan adanya *low velocity layer* dari goa telah dibuat dan kemudian diuji dengan inversi tomografi menggunakan PROFIT. Gambar 3 menunjukkan hasil *ray tracing* dari model goa. *Ray* terlihat menjalar dari sumber ke penerima dan mengalami pembiasan pada lapisan-lapisan sintetik yang telah dibuat. Namun *ray* cenderung menghindari goa sintetik pada jarak 200 sampai 270 m karena memiliki *low velocity*. Dari *ray* sintetik ini kemudian diperoleh grafik *travel time* sintetik seperti pada Gambar 4, yang kemudian digunakan sebagai data untuk inversi tomografi. Pada grafik *travel time*, waktu penjalaran gelombang semakin lama pada jarak 200 m dan 300 m karena berusaha menghindari *low velocity layer* dari goa sintetik.

Terlebih dahulu dilakukan penentuan jumlah iterasi yang digunakan dalam inversi tomografi. Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara nilai RMS error dengan jumlah iterasi yang digunakan pada inversi tomografi (model tebakan awal I, nilai $SM = 10$, nilai $AM = 5$). Perubahan nilai RMS error yang cukup signifikan terjadi pada iterasi ke-1 hingga iterasi ke-10, yaitu 4,03 ms. Berbeda dengan perubahan nilai RMS dari iterasi ke-10 hingga iterasi ke-30 yang cenderung rendah yaitu hanya sekitar 0,3 ms sampai 0,1 ms. Oleh karena itu, jumlah iterasi sebanyak sepuluh kali dianggap cukup untuk menyelesaikan inversi tomografi ini.

Pengujian diawali dengan *trial and error* pada model tebakan awal dengan parameter *damping* ($SM = 10$ dan $AM = 5$) yang sama. Berdasarkan perbandingan nilai RMS error pada iterasi ke-10 yang ditunjukkan pada Gambar 5, juga menunjukkan bahwa inversi menggunakan model tebakan awal III memiliki nilai RMS error terendah. Model tebakan awal III yang ditunjukkan pada Gambar 6 selanjutnya akan digunakan pada tahap *trial and error* pada variasi nilai SM dan AM .

Pada tahap *trial and error* nilai SM dan AM ini telah dilakukan dua puluh empat kali percobaan inversi dengan nilai SM dan AM yang berbeda. Variasi nilai SM dan AM serta nilai RMS error pada iterasi terakhir secara lengkap ditunjukkan Tabel 1. Variasi dimulai dari nilai SM dan AM yang sama-sama rendah, kemudian dinaikkan secara perlahan. Dilakukan juga variasi dengan nilai SM yang lebih tinggi daripada nilai AM atau sebaliknya.

Dari dua puluh empat kali, ketika nilai SM sebesar 10 dan nilai AM sebesar 5 memiliki nilai RMS error terendah, ditunjukkan pada Tabel 1 pada baris berwarna abu-abu. Gambar 7 menunjukkan hasil

inversi dengan parameter nilai *damping* tersebut. Posisi goa sintetik dapat direkonstruksi cukup baik yaitu pada jarak 160 m hingga 270 m dan elevasi 80 m hingga 30 m, meskipun bentuknya belum sempurna karena menyerupai struktur sinklin. Nilai kecepatan yang dihasilkan juga berbeda dengan model sintetiknya, yaitu 1,2 km/s sampai 1,6 km/s. Tidak adanya *ray* yang melewati goa karena *low velocity* yang dimiliki menyebabkan bentuk dan nilai kecepatan goa tidak sesuai dengan model sintetik yang dibuat. Bentuk sepuluh lapisan yang berada di luar goa juga tidak dapat direkonstruksi dengan cukup baik, karena masih berbentuk lengkungan. Hasil inversi yang secara geologi lebih logis ditunjukkan ketika meningkatkan nilai SM hingga 100 dan nilai AM tetap pada nilai 5, meskipun nilai RMS error yang dihasilkan lebih besar, ditunjukkan pada Tabel 1 pada baris berwarna kuning. Bentuk goa dan lapisan berlapis yang berada di luar goa menjadi lebih halus dan mendekati model sintetiknya, ditunjukkan pada Gambar 8. Jumlah lapisan berlapis yang dapat dikenali cukup baik hanya ada lima lapisan, yaitu tiga diantaranya berada di atas goa dan dua lainnya berada di bawah goa, meskipun dengan ketebalan yang tidak tepat. Lima lapisan yang berada di samping goa tidak dapat direkonstruksi dengan cukup baik.

Uji Model Intrusi

Pemodelan maju untuk model sintetik intrusi dengan empat lapisan dan dua tubuh intrusi batuan beku sintetik (*sill* dan *dyke*) telah dibuat. Hasil *ray tracing* dari model ini ditunjukkan pada Gambar 9. Jalur sinar dari sumber ke penerima mengalami pembiasan pada batas lapisan dan tubuh intrusi batuan beku. Dari hasil *ray tracing* ini kemudian didapatkan grafik *travel time* yang ditunjukkan pada Gambar 10. Waktu penjalaran gelombang terlihat semakin singkat pada jarak 400 m dan 1100 m yang merupakan posisi keberadaan tubuh intrusi dengan nilai kecepatan gelombang paling tinggi. Data ini kemudian digunakan dalam proses inversi tomografi.

Trial and error diawali dengan penggunaan model tebakan awal yang berbeda, namun dengan parameter *damping* yang sama ($SM = 10$ dan $AM = 5$). Berdasarkan Gambar 11 yang menunjukkan hubungan antara nilai RMS error dengan jumlah iterasi pada masing-masing model tebakan awal yang digunakan, menunjukkan nilai RMS error pada model tebakan awal I lebih rendah. Oleh karena itu, model tebakan awal I yang ditunjukkan pada Gambar 12 digunakan pada tahapan selanjutnya yaitu *trial and error* pada nilai parameter *damping*.

Model tebakan awal I digunakan dalam dua puluh tiga *trial and error* dengan variasi nilai SM dan

AM. Nilai *SM* dan *AM* awalnya dibuat sama dan rendah, kemudian meningkatkannya secara perlahan berdasarkan nilai RMS error pada iterasi ke-10. Rekap secara lengkap antara nilai *SM* dan *AM* serta nilai RMS error ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai RMS error cukup rendah didapatkan ketika nilai *SM* dan *AM* sama-sama sebesar 20. Selanjutnya nilai *SM* dibuat lebih tinggi daripada nilai *AM*, berdasarkan hasil pada inversi model goa. Rentang perbedaan kedua nilai ini divariasikan. Didapatkan nilai RMS error terendah ketika nilai *SM* sebesar 20 dan nilai *AM* sebesar 0,5, ditunjukkan pada Tabel 2 pada baris berwarna abu-abu. Hasil inversi dengan parameter damping tersebut juga cukup baik, ditunjukkan pada Gambar 13.

Tubuh intrusi batuan tipe *dyke* dapat direkonstruksi cukup baik yaitu pada jarak 250 m hingga 500 m dengan elevasi 170 m serta memiliki kecepatan yang sama dengan model sintetik yaitu 4 km/s. Berbeda dengan tubuh intrusi batuan tipe *sill* yang hanya mampu direkonstruksi setengah tubuhnya saja, karena kekurangan sinar yang dapat merambat di sana dan terletak di ujung lintasan. Setengah tubuh intrusi *sill* yang dapat terekonstruksi berada pada posisi yang cukup tepat yaitu pada jarak 1100 m sampai 1350 m dengan elevasi 90 m, serta kecepatan yang tepat pula yaitu 4 km/s. Fitur *low velocity layer* yang terletak di bawah tubuh intrusi *sill* juga dapat direkonstruksi pada jarak 1100 m. Lapisan pertama dan kedua yang berada di luar tubuh intrusi berhasil direkonstruksi dengan cukup baik, sedangkan lapisan ketiga dan keempat tidak cukup baik direkonstruksi. Lapisan kedua secara umum memiliki bentuk yang serupa dengan model sintetik, namun pada jarak antara 400 m hingga 1200 m memiliki bentuk lengkungan yang tidak sesuai karena pengaruh lapisan pertama yang berundulasi cukup kuat. Lapisan ketiga belum cukup baik direkonstruksi karena bentuk lengkungannya belum sesuai dengan model sintetik, namun nilai kecepataannya dapat direkonstruksi dengan baik. Lapisan keempat yang terletak paling bawah (kecepatan lapisan ke-4 3,5 km/s) tidak dapat direkonstruksi dengan baik, karena *ray* cenderung banyak merambat pada tubuh intrusi yang terletak di atasnya sehingga lapisan keempat kekurangan *ray*. Hasil cukup baik untuk memperbaiki lengkungan lapisan ketiga atau logis secara geologi diperoleh ketika nilai *SM* sebesar 80 dan *AM* tetap pada 0,5, meskipun nilai RMS errornya bertambah seperti ditunjukkan pada Tabel 2 pada baris berwarna kuning. Hasil inversinya ditunjukkan pada Gambar 14. Hasil inversi dengan parameter ini dinilai cukup baik untuk dapat merekonstruksi model sintetik intrusi yang cukup kompleks.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil *trial and error* pada model sintetik dapat diketahui hal-hal yang perlu diperhatikan, kelebihan, dan kelemahan pada kode PROFIT. Hasil inversi tomografi menggunakan PROFIT sangat dipengaruhi oleh rentang kecepatan model awal, nilai *SM*, dan nilai *AM*. Diperlukan informasi untuk menentukan rentang kecepatan model awal yang sesuai. Nilai *SM* sebaiknya dibuat pada rentang nilai 80 hingga 100 agar lapisan-lapisan batuan yang cukup datar dapat direkonstruksi. Nilai *AM* sebaiknya dibuat cukup rendah, yaitu 1 sampai 0,5 jika menemui kasus bawah permukaan yang cukup kompleks seperti model intrusi. Nilai *SM* sebaiknya selalu lebih tinggi daripada nilai *AM*. Kesulitan ditemui ketika *trial and error* nilai *SM* dan *AM*, karena tidak memiliki batas maksimal dan minimal.

Posisi goa sintetik dapat direkonstruksi cukup baik, namun bentuknya kurang sempurna atau menyerupai struktur sinklin, karena tidak adanya *ray* yang melewati goa (*low velocity*) dan nilai kecepatan yang dihasilkan juga berbeda dengan model sintetiknya, yaitu 1,2 km/s sampai 1,6 km/s. Hasil berbeda ditunjukkan pada model intrusi. Fitur intrusi batuan beku tipe *dyke* dan *sill* serta *low velocity layer* pada model intrusi karena pengaruh tipe intrusi *sill* yang cukup kompleks dapat direkonstruksi dengan cukup baik dengan inversi tomografi. Pada model intrusi, tubuh intrusi batuan tipe *dyke* dan setengah tubuh intrusi tipe *sill* dapat direkonstruksi cukup baik dan memiliki kecepatan yang sama dengan model sintetik yaitu 4 km/s. Lapisan kedua pada model intrusi pada jarak antara 400 m hingga 1200 m memiliki bentuk lengkungan yang tidak sesuai karena pengaruh lapisan pertama yang berundulasi cukup kuat. Jika kode PROFIT akan diterapkan pada pengolahan data lapangan, diperlukan informasi pada lokasi penelitian untuk menentukan rentang kecepatan model awal yang sesuai (data log kecepatan). Modifikasi juga dapat dilakukan pada script Kode PROFIT untuk memperbaiki kelemahan-kelemahan yang telah disebutkan.

Penulis

- 1 Diva Alfiansyah

Dari :

(1) Laboratorium Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta

- 2 Eddy Hartantyo

Dari :

(1) Laboratorium Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta,

Pustaka

1. Everett, M. E. 2013. Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press
2. Hobro, J. W., Singh, S. C., dan Minshull, T. A. 2003. Three-dimensional tomographic inversion of combined reflection and refraction seismic travel time data. *Geophysical Journal International*, 152(1), 79-93.
3. Hole, J. A. 1992. Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B5), 6553-6562.
4. Khalil, M. H., dan Hanafy, S. M. 2008. Engineering applications of seismic refraction method: A field example at Wadi Wardan, Northeast Gulf of Suez, Sinai, Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), 132-141
5. Korenaga, J., Holbrook, W. S., Kent, G. M., Kelemen, P. B., Detrick, R. S., Larsen, H.C., dan Dahl-Jensen, T. 2000. Crustal structure of the southeast Greenland margin from joint refraction and reflection seismic tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9), 21591-21614.
6. Koulakov, I., Stupina, T., dan Kopp, H. 2010. Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data. *Geophysics*, 75(3), B115-B136.
7. Paige, C. C., dan Saunders, M. A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 8(1), 43-71.
8. Sjogren, B. 2013. *Shallow refraction seismics*, Springer Science dan Business Media.
9. Schön, J. 2011. *Physical properties of rocks: A workbook (Vol. 8)*. Elsevier.
10. Sismanto. 2016. *Pengantar Survei dengan menggunakan Gelombang Seismik*. Yogyakarta: Gerbang Media Aksara
11. Um, J., dan Thurber, C. 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the Seismological Society America*, 77(3?), 972-986.
12. Zelt, C. A., dan Barton, P.J. (1998). Three-dimensional seismic refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B4), 7187-7210.

DAFTAR TABEL

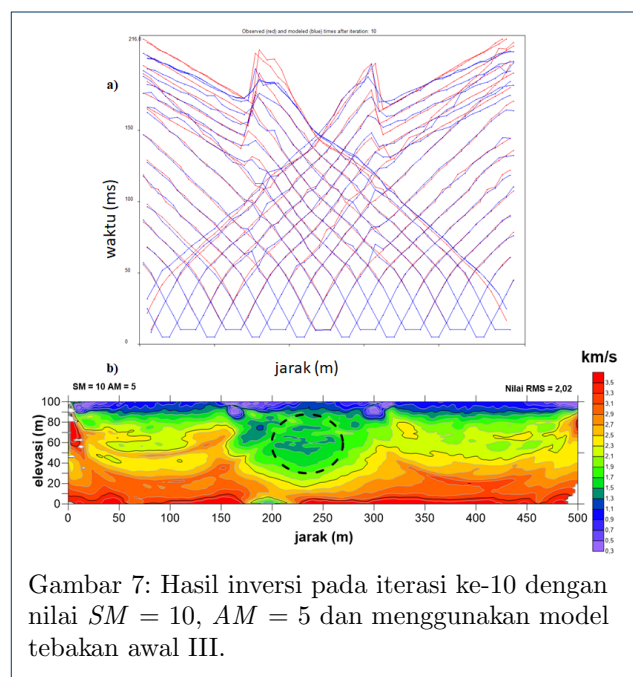
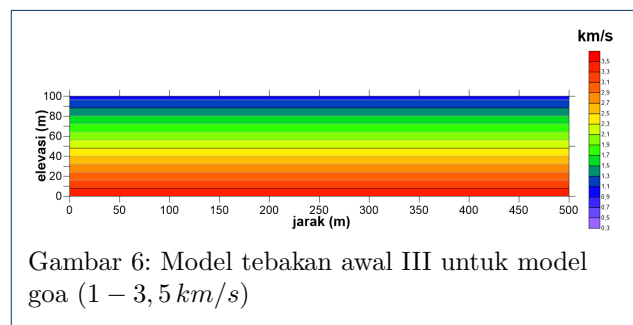
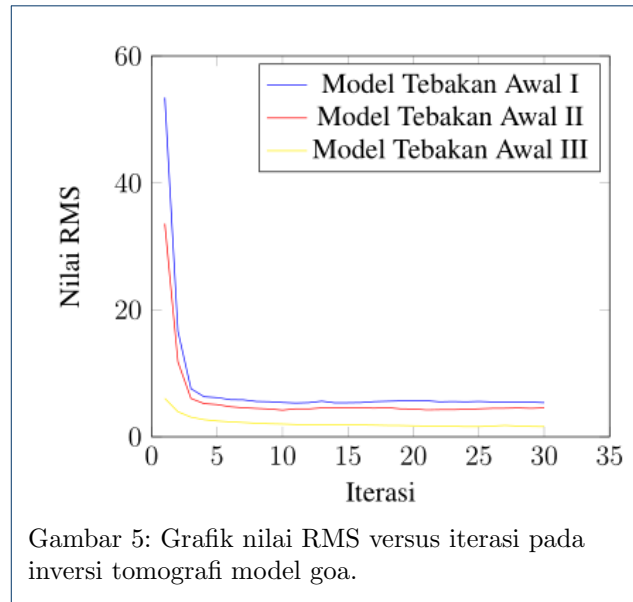
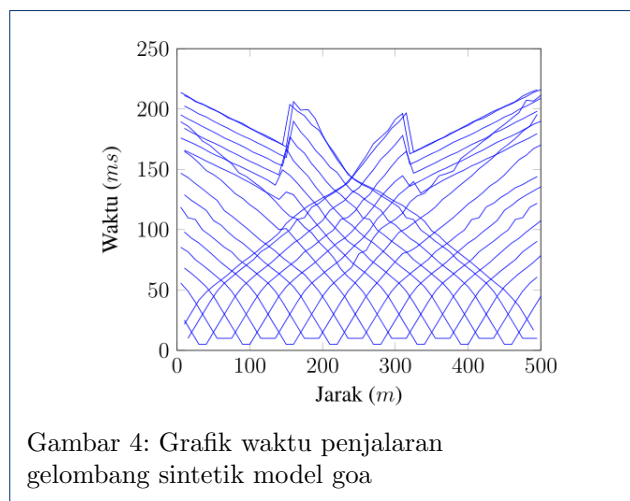
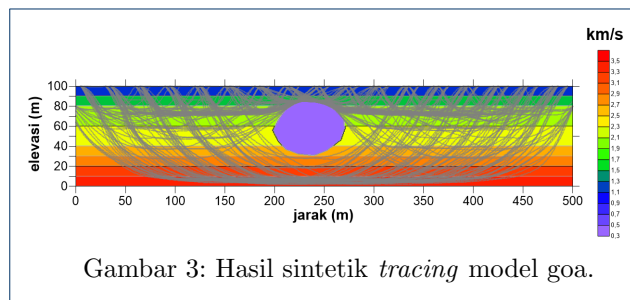
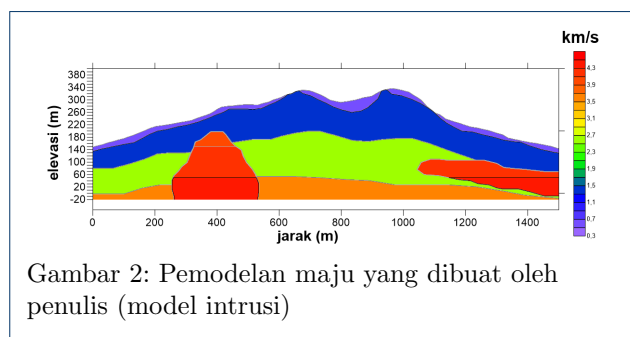
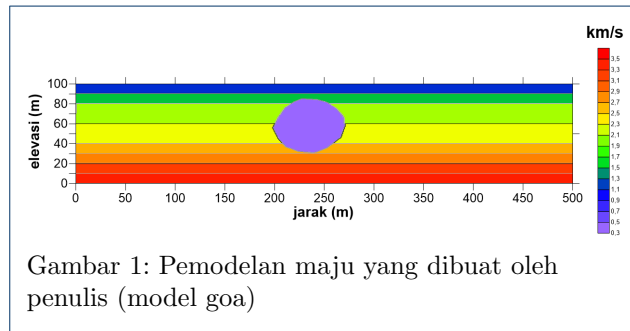
Tabel 1: Perbandingan nilai RMS *error* terhadap variasi nilai *SM* dan *AM* pada model goa

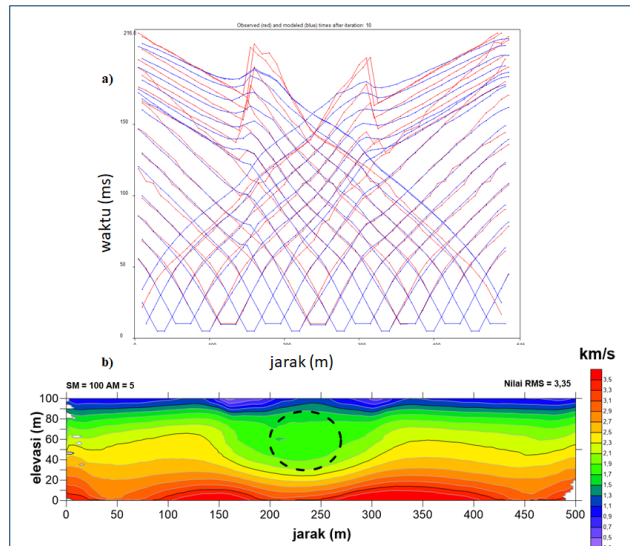
No	SM	AM	Nilai RMS
1	0.5	0.5	2.517939
2	1		0.5
3	10	0.5	2.198296
4	5	1	2.173326
5	10	5	2.024216
6	15	5	2.130633
7	20	5	2.027539
8	30	5	2.240587
9	40	5	2.497594
10	50	5	2.675186
11	60	5	2.842973
12	70	5	2.966385
13	80	5	3.103147
14	90	5	3.224794
15	100	5	3.358256
16	120	5	3.626296
17	140	5	3.887027
18	160	5	4.126814
19	5	10	2.332254
20	15	10	2.509783
21	20	10	2.475693
22	10	15	2.881768
23	20	15	2.994642
24	10	20	3.357671

Tabel 2: Perbandingan nilai RMS *error* terhadap variasi nilai *SM* dan *AM* pada model intrusi

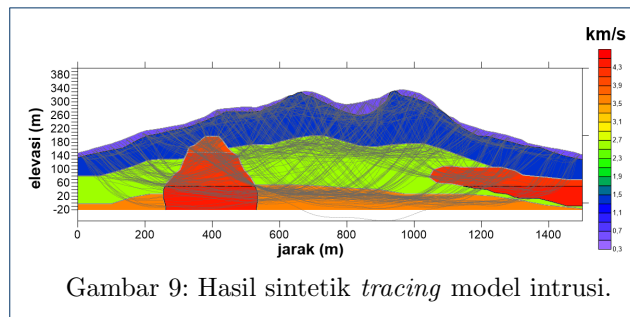
No	SM	AM	Nilai RMS
1	0.5	0.5	10.52524
2	20	0.5	2.939249
3	30	0.5	3.158016
4	40	0.5	3.158016
5	50	0.5	3.665458
6	60	0.5	3.912252
7	70	0.5	4.216644
8	80	0.5	4.487213
9	90	0.5	4.772619
10	100	0.5	5.036789
11	150	0.5	6.061144
12	20	1	2.974658
13	5	5	4.719247
14	10	5	4.390682
15	20	5	3.047246
16	30	5	3.13499
17	10	10	3.980033
18	20	10	3.106067
19	30	10	3.139604
20	20	20	3.177284
21	30	20	3.239495
22	30	30	3.451717
23	40	30	3.706979

DAFTAR GAMBAR

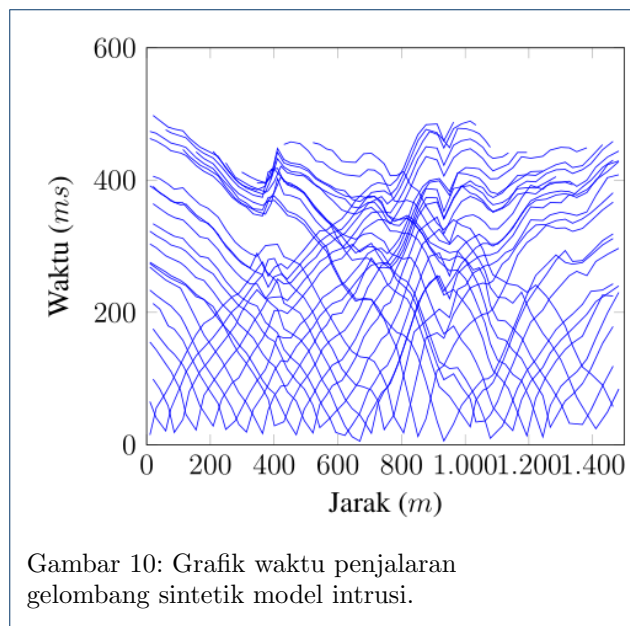




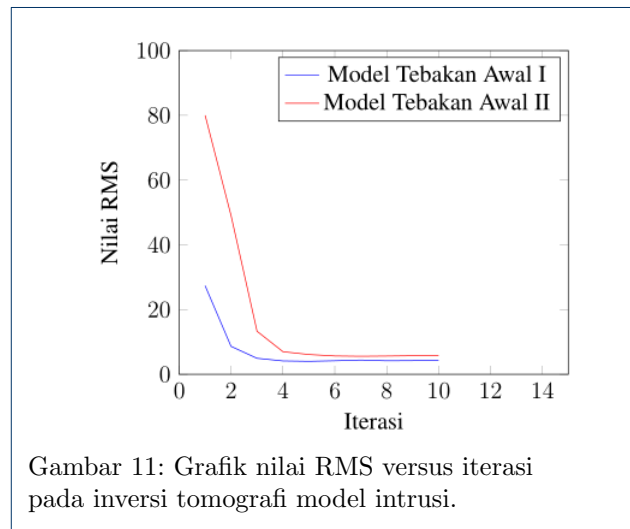
Gambar 8: Hasil inversi pada iterasi ke-10 dengan nilai $SM = 100$, $AM = 5$ dan menggunakan model tebakan awal III.



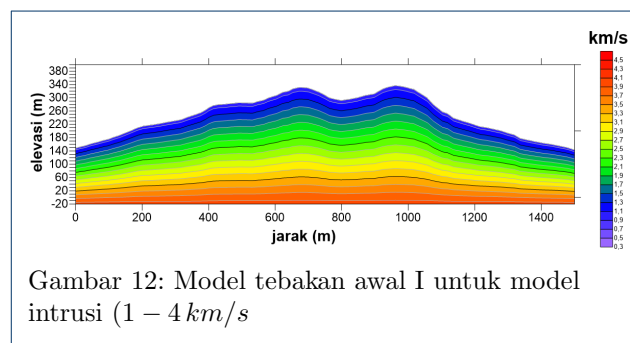
Gambar 9: Hasil sintetik *tracing* model intrusi.



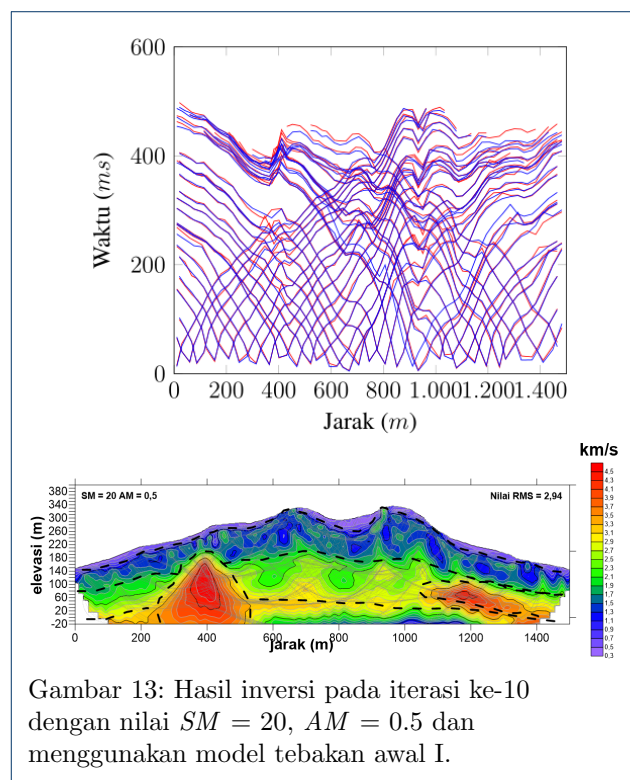
Gambar 10: Grafik waktu penjalaran gelombang sintetik model intrusi.



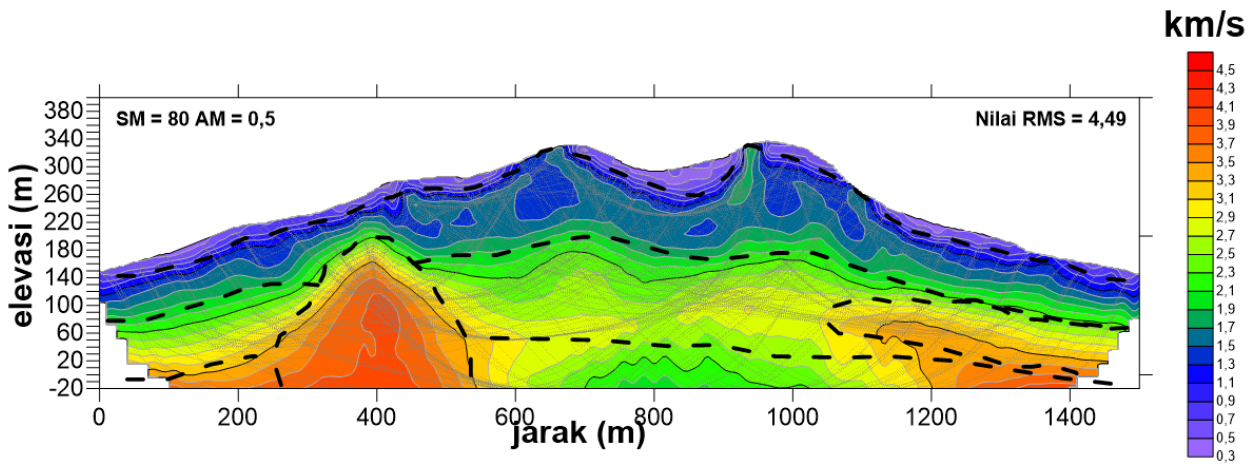
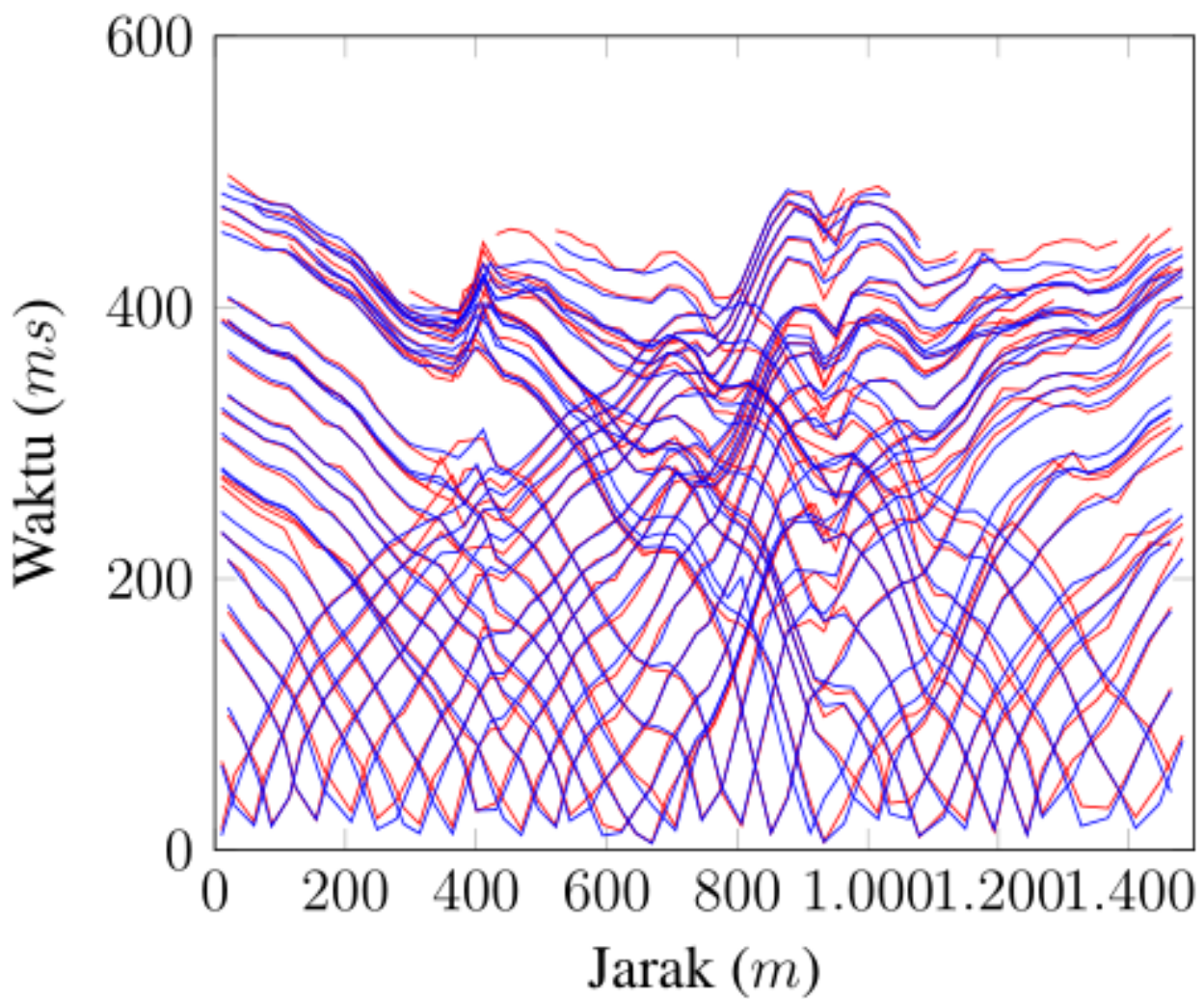
Gambar 11: Grafik nilai RMS versus iterasi pada inversi tomografi model intrusi.



Gambar 12: Model tebakan awal I untuk model intrusi ($1 - 4 \text{ km/s}$)



Gambar 13: Hasil inversi pada iterasi ke-10 dengan nilai $SM = 20$, $AM = 0.5$ dan menggunakan model tebakan awal I.



Gambar 14: Hasil inversi pada iterasi ke-10 dengan nilai $SM = 80$, $AM = 0,5$ dan menggunakan model tebakan awal I.