

Penentuan Hiposenter Menggunakan *Simulated Annealing* Dan *Guided Error Search* Serta Penentuan Model Kecepatan Gelombang Seismik 1-D Pada Lapangan “*Geothermal*”

Akhmad Fanani Akbar¹, Andri Dian Nugraha¹, M. Rachmat Sule¹,
Aditya Abdurrahman Juanda²

¹Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan,
Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10 Bandung, 40132

²PT. Pertamina Geothermal Energy, Indonesia
Email : fanani_akbar@yahoo.co.uk

Abstrak

Penentuan hiposenter gempa mikro untuk lapangan geotermal gunung “Tinggi” telah dilakukan dengan menggunakan metoda *simulated annealing* dan *guided error search* dan model kecepatan gelombang seismik satu dimensi (1D). Untuk mempercepat proses penentuan lokasi hiposenter metoda perpotongan tiga lingkaran digunakan untuk memfokuskan area dimana penentuan lokasi hiposenter dilakukan. Data yang digunakan adalah waktu tiba gelombang P dan S. Dalam proses *simulated annealing* dan *guided error search*, penghitungan waktu tempuh minimum dari *source* ke *receiver* dilakukan dengan menggunakan *ray tracing* dengan metoda *shooting*. Hasil dari *simulated annealing* dan *guided error search* menunjukkan bahwa gempa terjadi pada kedalaman 3-4 km di bawah permukaan laut. Hal ini sesuai dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa pada kedalaman tersebut terdapat area paling aktif dimana tempat terjadinya banyak *fracture*. Hasil posisi hiposenter gempa tersebut digunakan sebagai salah satu data awal pada program VELEST yang berfungsi untuk melakukan perbaikan model kecepatan gelombang seismik 1D. Hasil dari VELEST menunjukkan bahwa terdapat V_p/V_s yang rendah pada kedalaman 3-4km. Kemungkinan berhubungan dengan batuan yang tersaturasi uap (gas).

Kata kunci: *Hipocenter, Simulated Annealing, Guided Grid Search, Model Kecepatan 1-D.*

Abstract

In this study, hypocenter determination of micro-earthquakes of Mount “Tinggi” has been conducted by employing simulated annealing and guided error search method using a 1D velocity model. In order to speed up the hypocenter determination process a three-circle intersection method has been used to guide the simulated annealing and guided error search process. We have used P and S arrival time data. In the simulated annealing and guided error search process, the minimum travel time from a source to a receiver has been calculated by using ray tracing with shooting method. The results show hypocenters of microearthquakes occurred at depths of about 3-4 km below mean sea level. The location of microearthquake in this study are correlated with high fractured zone that were inferred from previous study. We then determine 1-D velocity model by applying VELEST method. The results of VELEST indicate there are low V_p/V_s ratio values at depths of 3-4km. We can interpret this feature as a rock layer which is saturated by vapor (gas).

Keywords: *Hypocenter, Simulated Annealing, Guided Grid Search, 1-D Velocity Model*

1. Pendahuluan

Aktivitas gunung api dan pergerakan lempeng dapat diketahui dengan pemetaan lokasi gempa. Selain itu pemetaan lokasi gempa juga dapat digunakan untuk memantau dan menganalisis reservoir geotermal khususnya gempa lokal dan gempa mikro. Namun penentuan lokasi absolut gempa tersebut dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut yaitu geometri stasiun pengamat, akurasi pembacaan waktu tiba, fasa gelombang yang tersedia, dan pengetahuan tentang struktur geologi pada daerah studi (Gomberg dkk., 1990). Untuk skala lokal, faktor geometri dan ketersediaan data bisa diperbaiki dengan menambah jumlah stasiun pengamat pada daerah penelitian. Faktor kesalahan model kecepatan gelombang seismik dan penentuan waktu tiba dapat diminimalisir dengan analisis yang lebih lanjut. Model kecepatan gelombang seismik bawah permukaan tidak bisa ditentukan secara pasti karena keterbatasan data dan kompleksitas struktur bawah permukaan.

Oleh karena itu, diperlukan model sederhana bawah permukaan untuk menentukan posisi gempa dengan baik. Untuk menentukan posisi gempa dengan baik diperlukan adanya proses pemodelan ke belakang. Metode pemodelan ke belakang ini bertujuan untuk mencari posisi yang memiliki nilai selisih antara data observasi dan data lapangan yang paling kecil (minimum global).

Teknik pemodelan ke belakang ini pada dasarnya adalah teknik pemodelan dengan cara mencoba-coba dan memodifikasi parameter model sehingga diperoleh kecocokan antara data perhitungan atau data estimasi dengan data lapangan. Namun karena heterogenitas dari kondisi geologi bawah permukaan bumi dan beberapa alasan lainnya seperti kekurangan data dalam membatasi atau mendefinisikan solusi, adanya pengaruh bising pada data lapangan, maka solusi dari pemodelan kebelakang ini menjadi tidak unik, artinya satu model bawah permukaan yang berbeda dapat memberikan respon dipermukaan yang sama.

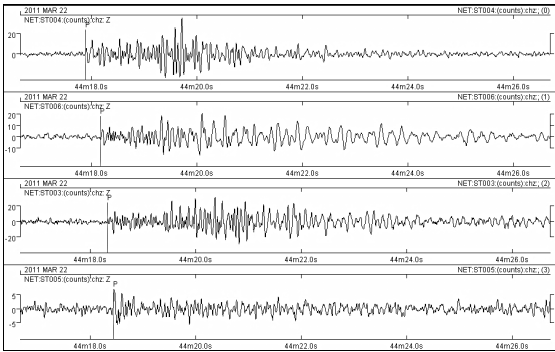
Oleh karena itu dibutuhkan suatu mekanisme pemodelan ke belakang yang dapat menghasilkan banyak realisasi atau kemungkinan model yang sesuai. Salah satu cara penyelesaiannya yaitu dengan menggunakan metode *Simulated Annealing*.

Pada kenyataannya pencarian solusi optimum dengan metode *Simulated Annealing* masih menimbulkan masalah, yaitu karena pada aturan ini semua kemungkinan yang ada disertakan dalam pencarian solusi yang menyebabkan proses perhitungan menjadi sangat lama dan kisaran nilai dari hasil pencarian solusi yang didapat relatif masih terlalu luas atau belum mendekati unik. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan modifikasi pada proses perturbasi model yaitu dengan menggunakan metode *Guided Error Search*. Latar belakang digunakan metode ini adalah agar batas ruang eksplorasi model semakin lama semakin dipersempit sehingga proses iterasi lebih cepat dan memiliki error yang minimum.

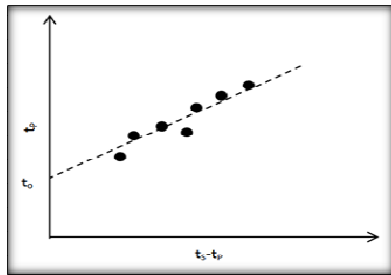
2. Metode

Untuk menentukan lokasi suatu gempa dibutuhkan waktu terjadinya gempa yang nantinya akan digunakan untuk menentukan *travel time*. Pada studi ini, waktu tiba gelombang P dan S untuk gempa mikro di-*pick* secara manual (Gambar 1).

Pada penelitian kali ini digunakan diagram Wadati untuk menentukan waktu terjadinya gempa mikro (Gambar 2). Beda waktu tiba gelombang P dan S ($t_S - t_P$) diplot terhadap waktu tiba gelombang P. Karena di hiposenter nilai $t_S - t_P$ bernilai nol, maka titik potong garis lurus hasil dari regresi merupakan pendekatan waktu terjadinya gempa.



Gambar 1. Contoh waveform gempa mikro yang terekam oleh empat stasiun pada komponen vertikal dalam studi ini.



Gambar 2. Contoh diagram Wadati dalam penentuan waktu terjadinya gempa mikro dalam studi ini.

Dari Gambar di atas didapatkan persamaan sebagai berikut

$$t_p = \frac{D}{V_p} + t_0 \text{ dan } t_s = \frac{D}{V_s} + t_0 \quad (1)$$

Dimana t_0 merupakan waktu terjadinya gempa dan dengan $V_p > V_s$ dan $t_s > t_p$ maka diperoleh persamaan:

$$t_s - t_p = r \left[\frac{V_p - V_s}{V_p V_s} \right] \quad (2)$$

$$r = \left[\frac{V_p V_s}{V_p - V_s} \right] (t_s - t_p) \quad (3)$$

$$K = \left[\frac{V_p V_s}{V_p - V_s} \right] \quad (4)$$

Dari persamaan 3 dan 4 didapat persamaan sebagai berikut:

$$r = K(t_s - t_p) \quad (5)$$

Untuk perhitungan mempercepat proses metode *Simulated Annealing* dan *Guided Error*

Search dibutuhkan lokasi gempa awal menggunakan metode perpotongan tiga lingkaran. Persamaan umum lingkaran adalah sebagai berikut:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (6)$$

Dimana nilai a dan b merupakan pusat lingkaran dengan jari-jari r . Waktu tiba gelombang P dan S diperlukan untuk menentukan jari-jari lingkaran tersebut. Setelah didapatkan nilai episenter dari gempa, kita bisa menentukan posisi kedalaman gempa terhadap salah satu stasiun.

2.1. Simulated Annealing

Pencarian solusi secara acak kurang efisien mengingat jumlah model yang harus dievaluasi masih cukup besar. Pemilihan model secara acak murni menyebabkan semua model dalam ruang model memiliki probabilitas yang sama untuk dipilih sebagai sampel dalam perhitungan fungsi obyektif. Model pada daerah yang jauh dari solusi juga harus dihitung responsnya.

Untuk meningkatkan efisiensi pencarian acak, pemilihan model dimodifikasi sehingga model pada daerah tertentu yang mengarah atau dekat dengan solusi memiliki probabilitas lebih besar untuk dipilih. Metode semacam ini disebut sebagai metode *guided random search*.

Salah satu metode *guided random search* atau pencarian acak terarah adalah metode *Simulated Annealing* (SA). Metode *Simulated Annealing* (Grandis, 2009) dalam inversi didasarkan pada proses termodinamika pembentukan kristal suatu substansi.

Pada temperatur tinggi suatu substansi padat mencair, kemudian proses pendinginan secara perlahan-lahan menyebabkan terbentuknya kristal yang berasosiasi dengan energy sistem yang minimum (Gambar 3).

Pada temperatur tinggi sistem mengalami perturbasi dan perturbasi yang menghasilkan konfigurasi dengan energi rendah memiliki kemungkinan lebih besar. Pada saat temperatur menurun, perturbasi yang menghasilkan

konfigurasi dengan energi lebih rendah memiliki probabilitas makin besar, sedangkan perturbasi yang menghasilkan konfigurasi dengan energi lebih tinggi probabilitasnya makin kecil. Pada proses *Simulated Annealing* ini ruang model harus didefinisikan terlebih dahulu dengan menentukan secara “a priori” interval harga minimum dan maksimum parameter model, dalam penelitian kali ini parameter modelnya adalah posisi gempa. Pemilihan harga parameter model ditentukan secara acak sebagai bilangan sembarang dalam interval nilai minimum dan maksimum masing-masing.

Caranya adalah mengambil bilangan acak R dengan probabilitas *uniform* antar 0 dan 1 yang dipetakan menjadi harga parameter model menggunakan persamaan berikut:

$$Model_i = Model_i^{min} + R(Model_i^{max} - Model_i^{min}) \quad (7)$$

Proses pembentukan kristal (*annealing*) dalam termodinamika diadopsi dalam penyelesaian masalah inversi dengan menggunakan parameter model untuk mendefinisikan konfigurasi sistem dan fungsi objektif (*misfit*) sebagai energi.

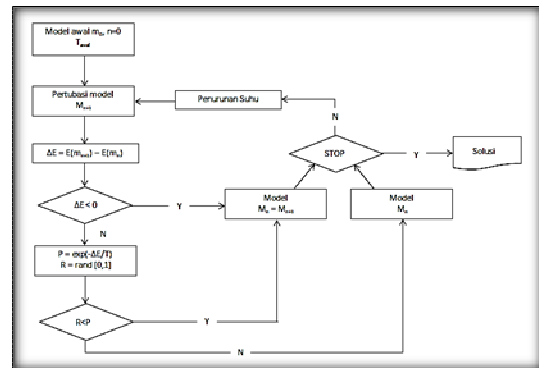
Faktor temperatur merupakan faktor pengontrol dengan satuan sama dengan fungsi objektif. Probabilitas perturbasi model dinyatakan oleh:

$$P(\Delta E) = \exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right) \quad (8)$$

Dimana ΔE adalah perubahan fungsi objektif atau perubahan misfit akibat *misfit* akibat perturbasi model tersebut. Jika $\Delta E < 0$, maka perubahan model diterima. Namun jika $\Delta E \geq 0$, maka penentuannya ditentukan secara probabilistik menggunakan bilangan acak R yang terdistribusi *uniform* pada interval [0,1]. Jika $R < P(\Delta E)$ maka perubahan diterima, sebaliknya jika $R \geq P(\Delta E)$ perubahan ditolak dan kembali kemodel sebelumnya.

Proses iterasi dimulai dengan temperature cukup tinggi sehingga hampir semua perturbasi

model diterima. Pada saat temperatur turun secara perlahan perturbasi model diterima mengecil jika $\Delta E \geq 0$. Hal ini bertujuan untuk menghindari konvergensi solusi keminimum lokal.



Gambar 3. Algoritma *Simulated Annealing* sederhana untuk inversi non-linier (Grandis, 2009)

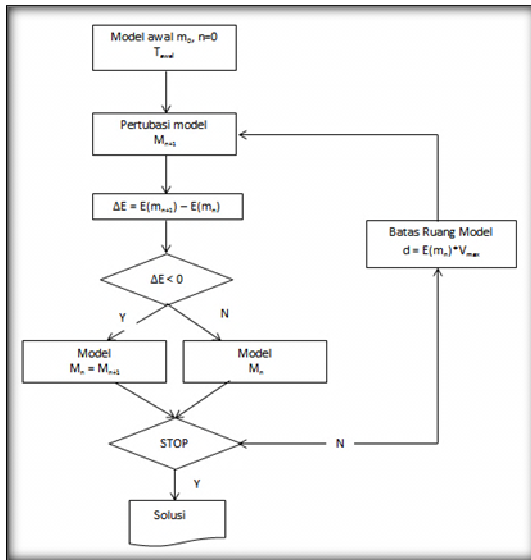
Mekanisme penurunan temperatur merupakan faktor yang perlu dilakukan secara coba-coba agar sesuai dengan permasalahan yang ditinjau. Proses SA berlangsung sebanyak jumlah iterasi tertentu dengan penurunan temperatur secara bertahap, pada penelitian ini skema penurunan temperatur dirumuskan:

$$T_n = \alpha T_{n-1} \quad (9)$$

T_n adalah temperatur ke-n dan α adalah konstanta penurunan temperatur. Penurunan temperatur tidak boleh terlalu cepat ataupun terlalu lambat. Penurunan yang terlalu cepat akan menyebabkan proses terjebak pada minimum lokal, sedangkan penurunan yang terlalu lambat akan membutuhkan waktu yang lama menuju fungsi objektif minimum. Dengan pemilihan skema temperatur yang tepat maka diharapkan akan memperoleh solusi minimum global. Skema penurunan temperatur dapat menggunakan fungsi linier ataupun logaritmik. Selain mempengaruhi waktu pengolahan, fungsi tersebut juga sangat mempengaruhi tingkat akurasi hasil akhir.

2.2. Guided Error Search

Pencarian menggunakan *guided error search* (Gambar 4) merupakan salah satu pencarian yang pada dasarnya memperkecil ruang eksplorasi model. Berbeda dengan *simulated annealing* yang menggunakan ruang eksplorasi model yang tetap dari awal hingga akhir sehingga proses untuk mencari nilai minimum lokal sangat lama.



Gambar 4. Algoritma *guided error search* Sama halnya dengan *simulated annealing*,

Pada proses *guided error search* ini ruang model harus didefinisikan terlebih dahulu dengan menentukan secara “a priori” interval harga minimum dan maksimum parameter model, dalam penelitian kali ini parameter modelnya adalah posisi gempa. Pemilihan harga parameter model ditentukan secara acak sebagai bilangan sembarang dalam interval nilai minimum dan maksimum masing-masing. Caranya adalah mengambil bilangan acak R dengan probabilitas *uniform* antar 0 dan 1 yang dipetakan menjadi harga parameter model menggunakan persamaan 7.

Pada model awal (M_n) dan model yang dipilih secara acak (M_{n+1}) tersebut ditentukan nilai error RMSnya, kemudian dicari selisih diantara keduanya ΔE dimana nilai tersebut

merupakan perubahan fungsi objektif akibat perubahan model.

$$\Delta E = E(M_{n+1}) - E(M_n) \quad (10)$$

Jika $\Delta E < 0$ maka perubahan model diterima, dan nilai error dari model tersenut dikalikan suatu konstanta (dalam penelitian ini digunakan kecepatan gelombang seismik) yang nantinya hasil perkalian tersebut digunakan untuk jarak antara model dengan batas eksplorasi ruang model. Setiap kali iterasi berlangsung, algoritma akan mencari satu titik referensi yang nantinya dibutuhkan untuk melakukan perhitungan untuk iterasi berikutnya.

2.3. Penentuan Model Kecepatan 1-D

Pada penelitian ini model kecepatan gelombang seismik bawah permukaan yang digunakan adalah model 1D, hal ini dilakukan sebagai bentuk penyederhanaan masalah terhadap model bawah permukaan sebenarnya. Model kecepatan gelombang seismik 1D biasa digunakan sebagai prosedur dalam penentuan lokasi gempa dan sebagai inisial model untuk seismik tomografi (Kissling, 1995; Kissling *et al.*, 1994). Salah satu metode penentuan model kecepatan gelombang seismik 1-D, adalah metode *coupled velocity-hypocenter* menggunakan program VELEST versi 3.1 (10.4.95) (Kissling, 1995).

Metode *coupled velocity-hypocenter* merupakan metode relokasi gempa, penentuan model kecepatan gelombang seismik bawah permukaan 1-D, dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode Geiger. Jumlah parameter modelnya (m) adalah $5 + N$, (x , y , z , t_0 , koreksi stasiun, dan N adalah jumlah lapisan model kecepatan gelombang seismik 1D).

Sebagai tahap pertama, didefinisikan m_0 yaitu parameter hiposenter (x , y , z , t_0), model kecepatan gelombang seismik (1D) dan koreksi stasiun. Selanjutnya *forward modeling* dilakukan dengan *ray tracing* dari gempa ke

stasiun sehingga memperoleh Tcal (Waktu tempuh perhitungan).

Inverse modeling dilakukan dengan menyelesaikan Matriks *Damped Least Square* [At A + L] (A = Matriks Jacobi, At = Tranpos Matriks Jacobi; L = Matriks *damping*). Penggunaan nilai *damping* akan mempengaruhi nilai perturbasi parameter model (Δm), dengan hubungan antara besarnya *damping* dan nilai Δm adalah berkebalikan.

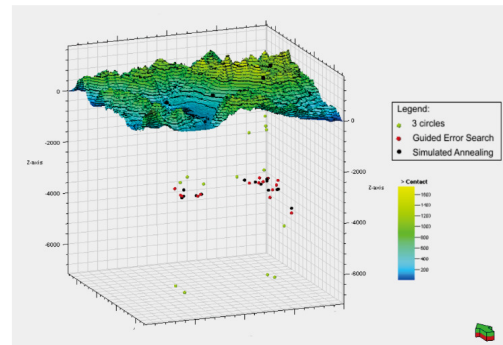
Hasil dari *inverse modeling* adalah vektor perbaikan parameter model (Δm) yang selanjutnya diperoleh nilai parameter hiposenter, model kecepatan gelombang seismik 1D, dan koreksi stasiun.

Dalam tahapan berikutnya nilai-nilai tersebut di *forward modeling* untuk memperoleh nilai Tcal baru yang akan dibandingkan misfitnya dengan Tcal sebelumnya dan demikianlah tahapan dalam VELEST untuk satu iterasi.

Dalam setiap iterasinya, tercantum nilai RMS antara data waktu tempuh observasi dan waktu tempuh perhitungan, sehingga jumlah iterasi dapat diatur hingga memenuhi kriteria RMS yang diharapkan.

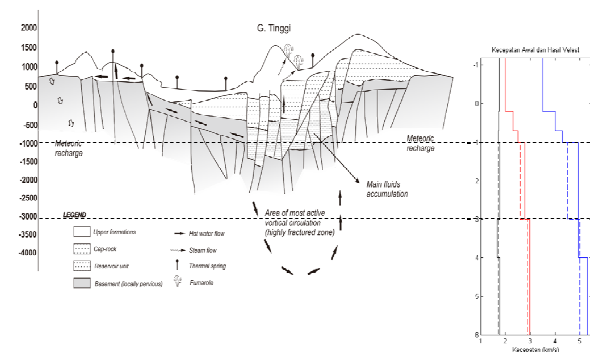
3. Hasil dan Diskusi

Pada hasil penentuan posisi gempa dengan menggunakan *simulated annealing* dan *guided error search*, persebaran hiposenter berada pada daerah gunung “Tinggi” dan sesar pada kedalaman sekitar 3 km sampai dengan 4.4 km di bawah permukaan laut (Gambar 5). Hal ini sesuai dengan apa yang diinterpretasikan oleh ELC-Electroconsult (1983), dimana pada kedalaman tersebut merupakan area paling aktif dimana tempat terjadinya banyak *fracture* yang juga merupakan tempat sirkulasi vertical (Gambar 6).



Gambar 5. Persebaran hiposenter gempa menggunakan *simulated annealing*, *guided error search*, dan tiga lingkaran.

Setelah didapatkan nilai hiposenter, kami melakukan penentuan model kecepatan 1-D yang salah satu *input*-nya merupakan lokasi hiposenter. Seperti yang terdapat pada Gambar 6, bahwa pada kedalaman 3-4 km terjadi penurunan nilai rasio Vp/Vs hasil dari studi ini. Dimana menurut Boitnott dkk (1997), hal ini mengindikasikan adanya *vapour reservoir*. Turunnya nilai rasio Vp/Vs ini, kemungkinan dikarenakan nilai Vp yang rendah karena meningkatnya *compressibility* dan meningkatnya Vs karena terjadi reduksi pada *pore pressure* yang mengakibatkan naiknya nilai *shear modulus*.



Gambar 6. Sirkulasi *hydrothermal* gunung “Tinggi” (ELC-Electroconsult, 1983) beserta kurva Vp, Vs, dan Vp/Vs yang diperoleh dari studi ini.

Tabel 1. Stasiun koreksi gelombang P dan S

Stasiun	Gel. P	Gel. S
ST1	0.02	0
ST2	0	0.07
ST3	0.06	0.15
ST4	0	-0.01
ST5	0.02	0.01
ST6	0.06	0.05

Hasil *output* dari *software* VELEST tidak hanya berupa nilai kecepatan model 1D saja, namun juga terdapat koreksi stasiun yang mencerminkan kondisi batuan di daerah sekitar stasiun (Tabel 1). Stasiun yang memiliki nilai koreksi stasiun yang kecil menandakan kondisi batuan di sekitar stasiun tersebut bersifat relatif kompak sedangkan jika nilai koreksi stasiunnya besar maka menandakan kondisi batuan di sekitar stasiun tersebut bersifat relatif lunak.

4. Kesimpulan

Dari penelitian penentuan lokasi gempa dengan menggunakan *simulated annealing* dan *guided error search* serta penentuan kecepatan gelombang seismik 1-D dengan menggunakan VELEST pada lapangan “Geothermal” dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Gempa lokal yang terekam tersebar pada daerah sesar dan gunung “Tinggi” pada kedalaman 3 km sampai dengan 4.4 km di bawah permukaan laut.
2. Pada kedalaman 3 km sampai dengan 4 km terdapat nilai rasio V_p/V_s yang rendah yang dapat diinterpretasikan sebagai *vapour reservoir*.
3. Dengan menggunakan data koreksi stasiun dapat diinterpretasikan bahwa pada daerah gunung “tinggi” memiliki kondisi batuan yang relatif lebih kompak daripada daerah sesar.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menghaturkan terimakasih kepada PT. Pertamina Geothermal Energy yang telah menyediakan data lapangan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Boitnott, G. N., Kirkpatrick, A., 1997. *Interpretation of Field Seismic Tomography at The Geysers Geothermal Field, California. in Proc. Twenty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.*, SGP-TR-155, Stanford University, Stanford CA.
- ELC-Electroconsult.,1983. *Feasibility Report Geothermal Area of Mt. Ambang. Kom-D-5646.*
- Gomberg, J. S., Shedlock, K. M. and Roecker, S. M., 1990. *The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, 1605–1628.
- Grandis, H., 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika.* Penerbit Himpunan Ahli Geofisika Indonesia., Bandung.
- Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D. and Kradolfer, U., 1994. *Initial reference models in local earthquake tomography. J. Geophys. Res.*, 99, 19635-19646.
- Kissling, E., 1995. Program VELEST USER’S GUIDE – *Short Introduction.* Institute of Geophysics, ETH Zuerich.