

## **KARAKTERISASI CAP ROCK DAN RESERVOIR AREA GEOTERMAL X BERDASARKAN STUDI SEISMISITAS DENGAN METODE SED**

*Anjar Oktikawati<sup>1)</sup>, Udi Harmoko<sup>1)</sup> dan Imam Baru Raharjo<sup>2)</sup>*

*<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang*

*<sup>2)</sup> PT. Pertamina Geothermal Energy, Jakarta*

*E-mail: [oktika.anjar@yahoo.com](mailto:oktika.anjar@yahoo.com)*

### **ABSTRACT**

*X geothermal area is located in the western Indonesia with high seismicity. Microearthquake (MEQ) data in geothermal exploration usually used as one of tools for approximating permeable structure in geothermal reservoir and for determining boundaries of reservoir.*

*Five seismic recording stations recorded the earthquake in the period October 2011 to December 2011. From 34671 records data stored on the period, only 68 events microearthquake (MEQ) are inverted to obtain the hypocenter with Single Event Determination method (SED).*

*Result inversion of the method show that permeable zone at X geothermal area is located at 10000 to 22000 X axis and 5000 to 12000 Y axis. Depth distribution shows that cap rock is located about 580 meter to 1100 meter mean sea level and the reservoir is located at altitude about 600 meter to -2000 depth.*

*Keywords: microearthquake (MEQ), hypocenter, SED, reservoir geothe.*

### **ABSTRAK**

*Area geotermal X berada di Indonesia sebelah Barat dengan seismisitas yang tinggi. Data microearthquake (MEQ) dalam eksplorasi geotermal biasanya digunakan sebagai salah satu alat untuk memperkirakan struktur permeabel pada reservoir geotermal dan untuk menentukan batasan-batasan reservoir.*

*Rekaman gempa pada periode Oktober 2011 hingga Desember 2011 terekam oleh lima stasiun perekam. Dari 35671 data rekaman yang tersimpan, hanya 68 event microearthquake (MEQ) yang merupakan gempa lokal dan dapat diinversi untuk mendapatkan hiposenter dengan metode Single Event Determination (SED).*

*Hasil inversi kedua metode menunjukkan bahwa zona permeabel area geotermal X berada pada koordinat sumbu X 10000 hingga 22000 dan pada koordinat sumbu Y 5000 hingga 12000. Distribusi kedalaman hiposenter memberikan dugaan bahwa cap rock berada pada ketinggian 580 meter hingga 1100 meter dari permukaan laut. Letak reservoir diduga berada pada ketinggian kurang 100 meter hingga kedalaman 1220 meter.*

*Kata kunci: microearthquake (MEQ), hiposenter, SED, reservoir geotermal.*

### **PENDAHULUAN**

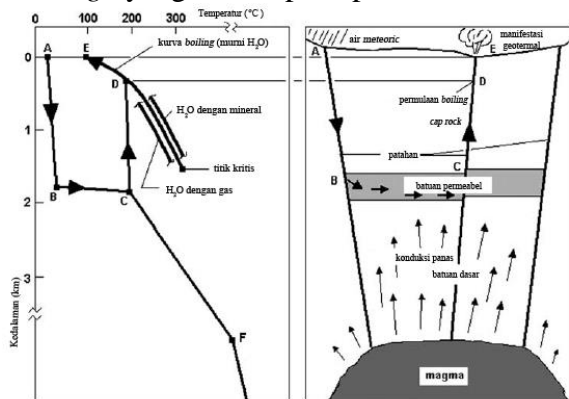
Area geotermal X berjarak 42 km di sebelah Tenggara kota Bandung, berada pada kompleks Gunung Guntur dan merupakan area hidrotermal aktif. Gempa dengan magnitudo kurang dari 3 secara umum digolongkan sebagai gempa mikro atau biasa disebut dengan *microearthquake*. Aplikasi dari *MEQ* sangat

banyak dalam industry geotermal, salah satunya sebagai alat untuk memperkirakan struktur permeabel pada reservoir geotermal, yaitu untuk memonitor pola aliran fluida dan untuk menentukan batasan-batasan reservoir yaitu *cap rock* yang merupakan lapisan batuan di atas reservoir dan bersifat impermeabel [1].

**DASAR TEORI**

**Sistem Geotermal Hidrotermal**

Sistem geotermal adalah konveksi air dalam kerak bumi bagian atas dalam ruang terbatas, mengalirkan panas dari sumber panas ke resapan air panas di permukaan [2]. Sistem geotermal diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu sistem hidrotermal, sistem vulkanik, dan sistem vulkanik -hidrotermal. Sistem geotermal di Indonesia sebagian besar merupakan sistem hidrotermal termasuk sistem geotermal area geotermal X [3]. Sistem hidrotermal [4] terbentuk atas: sumber panas, reservoir yang permeabel, suplai air, lapisan batuan atas yang impermeabel (*cap rock*), dan mekanisme *recharge* yang baik seperti pada Gambar 1



**Gambar 1** Skema model sistem hidrotermal[4]

**Microearthquake (MEQ)**

Gempa bumi dengan magnitudo kurang dari 3 biasanya disebut dengan *microearthquake (MEQ)*. *MEQ* biasanya terekam pada area yang relatif sempit atau disebut juga lokal area [1]. Berikut Tabel 1 yang menunjukkan klasifikasi gempa berdasarkan magnitudo

**Tabel 1** Klasifikasi gempa berdasarkan magnitudo [5]

Magnitudo (M)	Klasifikasi
$M \geq 7$	Gempa besar
$5 \leq M < 7$	Gempa sedang
$3 \leq M < 5$	Gempa kecil
$1 \leq M < 3$	<i>Microearthquake</i>

$M < 1$

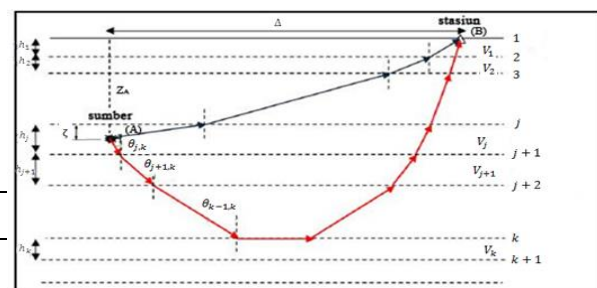
Ultra - *microearthquake*

*MEQ* merupakan metode yang efektif dalam eksplorasi geotermal [6], [7], [8], [9]. Berdasarkan survei peninjauan medan, *MEQ* telah diteliti pada banyak area geotermal di dunia, dan dengan gempa mikro dapat menunjukkan korelasi terhadap aktifitas geotermal yaitu pemetaan *MEQ* yang detail pada area geotermal, patahan aktif berada di sepanjang uap dan air panas yang terbawa hingga permukaan bumi [1].

**Algoritma Perhitungan Waktu Tempuh Kalkulasi Hiposenter *MEQ***

Model bumi diasumsikan merupakan model kecepatan berlapis mendatar (1D). Pembahasan teori waktu tempuh kalkulasi dimulai dengan konsep sederhana penentuan *ray path* pada model dua lapis dengan sumber dan stasiun pada permukaan, kemudian dikembangkan untuk n-lapis model kecepatan dengan lokasi sumber dan stasiun yang bervariasi [1].

Hasil analisis matematis dengan sumber berada pada titik A dengan koordinat  $(x_A, y_A, z_A)$ , dan stasiun pada titik B dengan koordinat  $(x_B, y_B, z_B)$ . Pertama model diatur sehingga stasiun terletak pada puncak lapisan pertama, dan dipakai  $V_i$  dan  $h_i$  masing-masing menyatakan kecepatan dan ketebalan dari lapisan ke-*i*. Dalam Gambar 2 diambil sumber di dalam lapisan ke-*j* di kedalaman  $\zeta$  dari puncak lapisan ke-*j*.



**Gambar 2** Ilustrasi penjalaran gelombang langsung (biru) dan gelombang refraksi (merah) [10]

Persamaan untuk sumber pada lapisan ke- $j$  dengan gelombang refraksi terjadi pada lapisan ke- $k$  sebagai berikut:

$$T_{jk} = \frac{x}{v_k} - \frac{\zeta(v_k^2 - v_j^2)^{1/2}}{v_j v_k} + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{h_i(v_k^2 - v_i^2)^{1/2}}{v_i v_k} + 2 \sum_{i=1}^{k-1} \frac{h_i(v_k^2 - v_i^2)^{1/2}}{v_i v_k} \quad (1)$$

$$\Delta_{c_{jk}} = -\frac{\zeta v_j}{(v_k^2 - v_j^2)^{1/2}} + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{h_i v_i}{(v_k^2 - v_i^2)^{1/2}} + 2 \sum_{i=1}^{k-1} \frac{h_i v_i}{(v_k^2 - v_i^2)^{1/2}} \quad (2)$$

### Metode Penentuan Hiposenter MEQ

Pada penelitian ini untuk *SED* digunakan teori dan prinsip metode Geiger. Geiger adalah suatu prosedur iterasi dengan menggunakan optimasi *Least Square* untuk menentukan lokasi hiposenter.

$t_i$  adalah waktu tiba gelombang seismik pada stasiun ke- $i(x_i, y_i, z_i)$  dari hiposenter  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $T_i$  adalah waktu tempuh dugaan berdasar model kecepatan dugaan bawah permukaan dan  $t_0$  adalah waktu kejadian gempa. Selisih antara hasil observasi dan hasil kalkulasi pada stasiun ke- $i$  bisa dihitung dengan persamaan (3)

$$r_i = t_i - t_0 - T_i \quad (3)$$

Prinsip metode ini adalah penyelesaian fungsi objektif yang memberikan jumlah kuadrat *residual* seluruh stasiun minimum.

$$F(p) = \sum_{i=1}^M r_i^2 \quad (4)$$

$M$  adalah jumlah stasiun dan  $p$  adalah parameter hiposenter  $(t_0, x_0, y_0, z_0)$ . Dengan fakta bahwa model struktur dan kecepatan bawah permukaan yang kompleks dan adanya faktor kesalahan pembacaan waktu tiba pada persamaan (3) di atas adalah persamaan non-linier. Untuk menyelesaikan minimasi di atas maka persoalannya dilinierkan dengan asumsi bahwa model kecepatan sudah mendekati model sebenarnya dan pembacaan waktu tempuh sudah benar, sehingga selisih

waktu tempuh adalah fungsi linier sederhana dari selisih parameter hiposenter dugaan dan sebenarnya. Linierisasi persamaan (4) bisa dituliskan kembali dalam bentuk persamaan (5)

$$r_i = \frac{\partial T_i}{\partial x_0} dx + \frac{\partial T_i}{\partial y_0} dy + \frac{\partial T_i}{\partial z_0} dz + dt \quad (5)$$

Bila persamaan (5) disusun untuk semua stasiun yang merekam gempa maka akan terbentuk sebuah matriks persamaan residual waktu tempuh. Matriks persamaan tersebut dapat dituliskan dalam bentuk persamaan (6)

$$[A]\Delta p = r \quad (6)$$

Penyelesaian inversi matriks di atas diberikan oleh persamaan (7)

$$[A]^T [A] \Delta p = -[A]^T r \quad (7)$$

Elemen penyusun matriks di atas adalah sebagai berikut:

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{dr_1}{dx} & \frac{dr_1}{dy} & \frac{dr_1}{dz} & \frac{dr_1}{dt} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dr_M}{dx} & \frac{dr_M}{dy} & \frac{dr_M}{dz} & \frac{dr_M}{dt} \end{bmatrix}$$

$$\Delta p = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix}$$

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

Matriks  $A$  adalah matriks *kernel* inversi. Matriks ini berisi *partial derivative residual* waktu tempuh tiap stasiun terhadap parameter hiposenter  $(t_0, x_0, y_0, z_0)$ . Matriks  $A$  berukuran  $n \times 4$ , dengan  $n$  adalah jumlah stasiun pengamat dan 4 merupakan representasi jumlah parameter hiposenter yang dicari. Matriks  $r$  adalah matriks data inversi. Matriks ini berisi residual waktu tempuh tiap stasiun pengamat dan berukuran  $n \times 1$ . Matriks  $\Delta p$  adalah matriks

model inversi. Matriks ini berisi vektor perubahan posisi terhadap hiposenter dugaan (awal) dan berukuran 4 x 1. Perbaikan lokasi hiposenter yang diperoleh adalah:

$$x_0 + dx = x, y_0 + dy = y, z_0 + dz = z, t_0 + dt = t \quad (9)$$

Perbaikan posisi hiposenter akan terus dilakukan dengan melakukan iterasi hingga residual waktu tempuh observasi dan kalkulasi mendekati nol.

### Metode Optimasi *Least-Square* untuk Mendapatkan Vektor Perubahan Parameter Hiposenter

Teknik optimasi *least-square* digunakan untuk mendapatkan vektor perubahan parameter hiposenter dari matriks turunan residual waktu tempuh terhadap parameter hiposenter dan matriks residual waktu tempuh.

Dalam bentuk metode *least square* biasa, pendekatan  $[H]$  hanya membutuhkan turunan pertama dari residu (sisa):

$$H \approx 2[A]^T[A] \quad (10)$$

Dengan bentuk persamaan inversi adalah  $A\delta p = r$ , maka dapat diperoleh penyelesaian optimasi *least square* sebagai berikut:

$$\delta p = \frac{1}{2}([A]^T[A])^{-1}[A]^T r \quad (11)$$

### Geologi Area Geothermal X

Area geothermal X berada di lintang selatan dan bujur barat negara kepulauan Indonesia dan memanjang dari timur ke barat rangkaian gunung api Rakutak – Guntur [11] pada ketinggian topografi antara 1400 m sampai 1800 m di atas permukaan laut [12]. Area ini berada di dekat area geothermal yang lain yaitu area geothermal Y dan area geothermal Z [13].



**Gambar 3** Peta fisiografi area geothermal X dan area geothermal di sekitarnya [13]

Geometri reservoir geothermal X merupakan hasil interaksi kompleks dari proses vulkano-tektonik aktif, stratigrafi yang lebih tua, dan struktur. Secara umum *cap rock* memiliki ketebalan 500 m – 600 m, dan 200 m – 300 m di bagian utara dan timur reservoir yang tersusun atas *prophylic* yang teralterasi dari batuan vulkanik [12].

Reservoir geothermal X yang produktif memiliki porositas tinggi, permeabilitas tinggi, temperatur tinggi, ukuran yang memenuhi syarat dan fluida yang cukup berada pada kedalaman antara 600 m – 2000 m. Reservoir tersusun atas andesit teralterasi yang kuat dan banyak mengandung *piroklastik* vulkanik. Permeabilitas pada reservoir ini dihasilkan oleh *event* struktural seperti patahan-patahan, kekar, dan rekahan atau oleh stratigrafi seperti intergranular porositas di *lapili*[14].

### METODE PENELITIAN

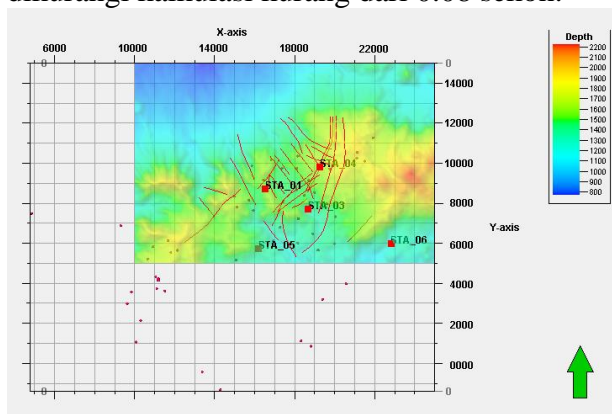
Data penelitian yang digunakan adalah data rekaman seismogram areageothermal X pada bulan Oktober 2011 hingga bulan Desember 2011 dari PT. Pertamina Geothermal Energy. Area geothermal X pada periode Oktober 2011 hingga Desember 2011 menggunakan lima stasiun perekam yaitu STA\_01, STA\_03, STA\_04, STA\_05, dan STA\_06 yang disusun berdasarkan metode konfigurasi tiga lingkaran.

Setelah data lapangan selesai didownload dari eksternal *harddisk recorder*, dilakukan pemrosesan data di *work station*. Kegiatan ini meliputi transfer data, konversi format data *raw*, asosiasi data, penentuan parameter, *picking* otomatis, *trimming*,

*picking* manual, serta penentuan episenter dan hiposenter dengan metode *SED*.

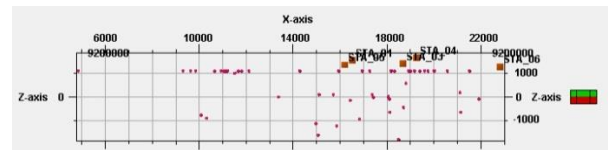
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan lokasi hiposenter *MEQ*, dilakukan dengan metode *SED* menggunakan model kecepatan 1 dimensi tujuh lapisan yang telah ditentukan sebelumnya dari pemodelan ke depan data sumur area geotermal X. Dalam inversi ini digunakan 68 data gempa lokal yang didapat dari 34671 data mentah yang telah diasosiasikan untuk tiap stasiun dan memiliki tiga komponen yaitu satu komponen vertikal dan dua komponen horisontal (*north-south* dan *east-west*). Dalam penelitian ini, inversi *SED* dilakukan saat *picking* gelombang P dan gelombang S menunjukkan nilai observasi dikurangi kalkulasi kurang dari 0.08 detik.



**Gambar 4** Plot lokasi episenter dengan metode *SED*

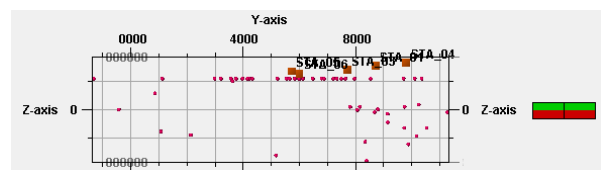
Garis-garis merah pada Gambar 4 menunjukkan patahan-patahan di area geotermal X dengan kotak merah persegi panjang merupakan letak stasiun perekam *MEQ*, sedangkan titik-titik berwarna merah muda pada Gambar 3 menunjukkan episenter *MEQ*. Distribusi episenter *MEQ* yang berada di luar peta topografi, tidak diperhitungkan dalam analisis zona permeabel karena berada di luar area geotermal X. Pada Gambar 4 terlihat bahwa titik-titik distribusi episenter mengikuti patahan-patahan pada area geothermal X dimana gempa mikro yang terjadi merupakan gempa *aftershock*, yaitu gempa-gempa kecil setelah terjadinya patahan.



**Gambar 4** Plot hiposenter dari metode *SED* pada penampang sejajar sumbu X

Berdasarkan *plot* hiposenter pada penampang sejajar sumbu X yang ditunjukkan pada Gambar 4, tampak bahwa reservoir geotermal X berada pada 9000 sampai dengan 22000 atau memiliki panjang area reservoir 13 km. Sedangkan daerah impermeabel sebagai batas reservoir geotermal ditunjukkan pula pada Gambar 4 dengan sumbu X kurang dari 9000 dan lebih dari 22000.

Berdasarkan *plot* hiposenter pada penampang sejajar sumbu Y yang ditunjukkan pada Gambar 5, tampak bahwa reservoir geotermal X berada pada 7000 sampai dengan 12000 atau memiliki lebar area reservoir 5 km. Sedangkan daerah impermeabel sebagai batas reservoir geotermal ditunjukkan pula pada Gambar 5 dengan sumbu Y kurang dari 7000 dan lebih dari 11000.



**Gambar 5** Plot hiposenter dari metode *SED* pada penampang sejajar sumbu Y

Karakteristik *cap rock* pada penampang sejajar sumbu X dan pada penampang sejajar sumbu Y masing-masing ditunjukkan oleh Gambar 4 dan Gambar 5. Letak *cap rock* berada pada ketinggian 580 meter hingga 1100 meter yang merupakan zona impermeabel atau ketebalan *cap rock* secara umum pada area geothermal X adalah 520 meter. Pada ketinggian 100 meter hingga kedalaman 1220 meter dari permukaan

laut merupakan zona permeabel yang diperkirakan sebagai reservoir atau ketebalan reservoir geotermal area geotermal X adalah 1320 meter.

### KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil inversi *SED* menunjukkan bahwa hiposenter *MEQ* area geotermal X periode bulan Oktober 2011 hingga Desember 2011 berada pada koordinat sumbu X antara 5000 hingga 25000 dan pada koordinat sumbu Y antara 12000 hingga 15000.
2. Hiposenter *MEQ* area geotermal X terdistribusi pada koordinat sumbu X 10000 hingga 22000 dan pada koordinat sumbu Y 5000 hingga 12000. Pada koordinat tersebut diduga merupakan zona permeabel dengan seismisitas yang tinggi.

Letak *cap rock* pada area geotermal diduga berada pada ketinggian 580 meter hingga 1100 meter di atas permukaan laut. Sedangkan letak reservoir diduga berada pada ketinggian 100 meter hingga kedalaman 1220 meter.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Stewart, S. W. and Lee, W. H. K., 1981, Principles and Applications of Microearthquake Networks. Academic Press, Inc., New York.
- [2] Hochstein, M.P., 1990, Classification and Assessment of Geothermal Resources, Small geothermal resources, UNITAR / UNDP Centre for Small Energy Resources, h. 31-59.
- [3] Hochstein, M.P. and Browne, P.R.L., 2000. Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources. Encyclopedia of Volcanoes, H. Sigurdsson, B.F. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, J. Stix, Academic Press, h. 835-855.
- [4] DiPippo, R., 2008, Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies, and Environmental Impact, Second Edition, Elsevier Ltd., New York.
- [5] Hagiwara, T., 1964, Brief description of the project proposed by the earthquake prediction research group of Japan. Proc. J.S.-Japan Conf.Res. Relat. Earthquake Prediction Probl., h. 10-12.
- [6] Ward, P. L., 1972, Microearthquakes: Prospecting tool and possible hazard in the development of geothermal resources. Geothermics 1, h. 3-12.
- [7] Combs, J. dan Hadley, D., 1977, Microearthquake investigation of the Mesa geothermal anomaly, Imperial Valley, California, Geophysics 42, h. 17-33.
- [8] Gilpin, B., and Lee, T. C., 1978, A microearthquake study in the Salton Sea geothermal area, California, Bull. Seismol. SOCA. 68, h. 441-450.
- [9] Majer, E. L. dan McEvelly, T. V., 1979, Seismological investigations at The Geysers geothermal field. Geophysics Vol. 44, h. 246-269.
- [10] Sahara, D.P. 2009. Pengembangan dan Aplikasi Metode Double Differential untuk Penentuan Relokasi Hiposenter Secara Akurat Studi Kasus: Gunung Kelud dan Model Sintetis Reservoir Geotermal. Skripsi. Fakultas Teknik Tambang dan Minyak. ITB. Bandung.
- [11] Komaruddin, UdanSujata, I.K., 2000, Evaluation of steam production decline trends in the Kamojang geothermal field, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu, Japan, h. 2857-2862.
- [12] Moeljanto, 2004, Evaluation of The Environmental Impact at The Kamojang Geothermal Field in Indonesia Applying the EMS of ISO 14001, Geothermal Training Programme, No. 11, Iceland.
- [13] Rejeki, S., Rohrs, D., Nordquist, G., and Fitriyanto, A., 2010, Geologic conceptual model update of the Darajat geothermal field, Indonesia, Proceedings World Geothermal Congress, Bali.
- [14] Sumintadireja, P., Sudarman, S., Mizunaga, H., and Ushijima, K., 2000, Mise-a-la-masse and gravity data surveys at the Kamojang geothermal field. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, h. 1777-1784, Kyushu-Tohoku, Japan.