

ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO DAN *POISSON'S RATIO* DI LAPANGAN PANASBUMI DESERT PEAK SEBELUM DAN SESUDAH STIMULASI *ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)*

Farkhan Raflesia^{1*}, Nandi Haerudin¹, Rustadi¹

¹Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Email : farkhan.rafliesia@gmail.com^{1*}

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang analisis sebaran hiposenter dan *poisson's ratio* di Lapangan Panasbumi Desert Peak, Negara Bagian Nevada, Amerika Serikat. Tujuan penelitian ini adalah membuat program penentuan hiposenter menggunakan *Graphical User Interfaces (GUI)* di MATLAB, menganalisis sebaran hiposenter dan *poisson's ratio*. Metode gempa mikro menggunakan sumber pengukuran gelombang seismik natural yang memiliki frekuensi rendah. Gempa mikro merekam gempa-gempa (≤ 3 SR). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog gempa mikro Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum EGS (September 2008 hingga Agustus 2010) dan sesudah EGS (Maret 2013 hingga Februari 2015). Sumber data dari *Northern California Earthquake Data Center (NCEDC)* dan merupakan data sekunder yang meliputi waktu tiba gelombang P dan S, posisi stasiun serta model kecepatan 1 dimensi. Penentuan hiposenter menggunakan metode SED dengan data awal berupa waktu tiba gelombang P dan S, model kecepatan 1 dimensi dan lokasi stasiun (UTM X, UTM Y dan elevasi). Sedangkan penentuan *poisson's ratio* menggunakan diagram wadati dengan data awal berupa selisih antara waktu tiba gelombang P dan S dengan *origin time*. Penentuan hiposenter gempa mikro berhasil dilakukan menggunakan program GUI di MATLAB yang dikembangkan penulis. Sebaran hiposenter yang dihasilkan mengikuti alur sesar *ridge rhyolite* yang merupakan lokasi utama Lapangan Panasbumi Desert Peak. Sesudah dilakukannya stimulasi EGS sebaran gempa mikro meningkat dua kali, dengan peningkatan paling tinggi berada di elevasi 500m (zona stimulasi EGS). Terjadi peningkatan nilai *poisson's ratio* sesudah dilakukan stimulasi EGS terutama di elevasi 500m (zona stimulasi EGS). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan saturasi air di area EGS sesudah stimulasi EGS.

ABSTRACT

A research has been conducted on analysis of hypocenter distribution and *poisson's ratio* in the Desert Peak Geothermal Field, the State of Nevada, USA. The purpose of this research is to make a hypocenter determination program using *Graphical User Interfaces (GUI)* in MATLAB, analyze hypocenter and *poisson's ratio* distribution. Methods of micro earthquake using natural seismic wave measurement sources that have a low frequency. Micro earthquake recording earthquakes (≤ 3 SR). The data used in this research are the micro earthquake data catalog of Desert Peak Geothermal Field before EGS (September 2008 to August 2010) and after EGS (March 2013 to February 2015). The data source is from *Northern California Earthquake Data Center (NCEDC)* and is secondary data covering the arrival time of P and S waves, station position and 1-dimensional speed model. Hypocenter determination using the SED method with preliminary data of the arrival time of P and S waves, 1-dimensional speed model and station location (UTM X, UTM Y and elevation). While the determination of *poisson's ratio* using wadati diagram with initial data in the form of the difference between the arrival time of wave P and S with *origin time*. Determination of the hypocenter of micro earthquake successfully done using the GUI program in MATLAB developed by writer. The resulting hypocenter distribution follows the *rhyolite ridge fault groove* which is the main location of Desert Peak Geothermal Field. After the EGS stimulation the micro earthquake distribution increased twice, with the highest increase being in the 500m elevation (EGS stimulation zone). An increase in the value of *poisson's ratio* after EGS stimulation, especially in the 500m elevation (EGS stimulation zone). This suggests an increase in water saturation in the EGS area after EGS stimulation.

Keywords: MATLAB, Hypocenter, *Poisson's ratio*

I. PENDAHULUAN

Lapangan Panasbumi Desert Peak berada di Negara Bagian Nevada, Amerika Serikat. Lapangan panasbumi ini merupakan lapangan panasbumi *hydrothermal* dengan temperatur sedang. Lapangan panasbumi ini mengalami penambahan produksi sebesar 1,7 MWe dari proses *enhanced geothermal system* (EGS) (Ethan dan Ezra, 2013). Proses ini dilakukan dengan cara menginjeksikan air bertekanan tinggi (stimulasi) melalui sumur injeksi ke dalam batuan reservoir. Akibatnya terjadi peningkatan permeabilitas batuan reservoir ke tingkatan komersial. Proses stimulasi EGS dilakukan pada tahun 2010 hingga 2013 di sumur 27-15 oleh Ormat Nevada, Inc..

Lapangan panasbumi sangat erat kaitannya dengan aktivitas gempa mikro (Foulger dan Long, 1984). Gempa jenis ini dapat digunakan untuk mempelajari lebih dalam mengenai sistem panasbumi yang sudah ataupun belum dieksploitasi (Maulida, 2015). Aktivitas gempa mikro yang terjadi pada lapangan panasbumi dapat menjadi sumber informasi yang penting mengenai kondisi reservoir. Terdapat kaitan hiposenter gempa mikro dengan munculnya zona rekahan akibat fluida reinjeksi serta aktivitas produksi (Gei dkk., 2010). Dengan mengintegrasikan posisi sebaran hiposenter dan nilai *poisson's ratio* bawah permukaan, dapat diamati perubahan yang mungkin terjadi pada area stimulasi EGS sebelum dan sesudah stimulasi EGS.

Penelitian ini menggunakan data waktu tiba gelombang P dan S sebelum EGS (September 2008 hingga Agustus 2010) dan sesudah EGS (Maret 2013 hingga Februari 2015) dan model kecepatan 1 dimensi dari katalog, penentuan hiposenter menggunakan program yang dikembangkan penulis menggunakan *Graphical User Interfaces* (GUI) di MATLAB, serta pengolahan data hingga model 3D sebaran *poisson's ratio* menggunakan *software* Oasis Montaj.

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah membuat program penentuan hiposenter menggunakan *Graphical User Interfaces* (GUI) di MATLAB, menganalisis sebaran hiposenter gempa mikro di Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum dan sesudah stimulasi EGS, dan menganalisis sebaran *poisson's ratio* di Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum dan sesudah stimulasi EGS.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Lokasi Daerah Penelitian

Posisi lokasi daerah penelitian diperlihatkan pada **Gambar 1**. Lapangan panasbumi Desert Peak secara administratif berada di Wilayah Churchill, Nevada. Terletak di bagian utara Pegunungan Hot Spring dengan ketinggian 1400 mdpl. Berada di koordinat geografis 39,75° Lintang Utara dan 118,95° Bujur Barat.

B. Geologi Daerah Penelitian

Lapangan panasbumi Desert Peak adalah sistem panas bumi yang tidak memiliki manifestasi permukaan berupa mata air panas atau fumarol. Suhu air di sumur produksi sekitar 215°C sesuai dengan data termometer geokimia. Lapangan panasbumi Desert Peak didominasi oleh sesar normal dengan tren utara-timur laut. Sesar yang paling signifikan di daerah ini adalah Zona Sesar *Rhyolite Ridge*, yang terdiri dari beberapa helai di sekitar lapangan panasbumi. Lapangan panasbumi Desert Peak lokasi utamanya berada di Zona Sesar *Rhyolite Ridge*.

Secara umum, batuan yang tersingkap dipermukaan deposit eolian kuarter yang terdiri dari batuan alluvial yang berasosiasi dengan batuan vulkanik dari Danau Lahontan saat Pleistosen (Formasi Truckee), Basalt Miosen (Formasi Choropaghus), dan Oligosen sampai miosen riolitik. Batuan bawah permukaan di Lapangan Panasbumi

Desert Peak terdiri dari batuan vulkanik oligosen akhir sampai miosen awal yang berada diatas *basement* granitik dan metamorfik mesozoik. Urutan bagian yang paling tebal dari deretan aliran debu riolitik tersier ubahan aliran lava dan tuff menghampar dan mengerosi bagian atas dari *basement* metamorfik.

Fluida reservoir terlihat naik dari kedalaman melewati rekahan atau patahan, lalu tertahan oleh sedimen permeabel yang berperan sebagai batuan penudung (*cap rock*). Batuan penudung ini memiliki ketebalan 244 meter yang terdiri dari zona aluvial dan Formasi Truckee. Reservoir terdiri dari Batuan vulkanik Tersier, batuan metavulkanik dan metasedimen pre-tercier. Keberadaan reservoir ini di kedalaman 244 meter sampai 2135 meter.

Keberadaan dari sedikitnya empat akuifer panas dekat permukaan telah dibuktikan dengan pemboran. Bagian paling atas dari reservoir ini berada pada elevasi 1262 meter dan bagian paling bawah dari akuifer ini berada pada elevasi 896 meter. Ketebalan akuifer bervariasi dari 3m sampai 366m. Sedangkan temperaturnya dari 39°C sampai 148°C. Akuifer tersebut diperkirakan memiliki luas 14 mil². Berdasarkan data geokimia, air dari akuifer ini berasal dari reservoir panasbumi Desert Peak dengan temperatur 204°C (Benoit dkk., 1982).

C. Energi Panasbumi

Energi panasbumi (*geothermal*) merupakan salah satu bentuk energi alami yang dihasilkan oleh bumi. Sesuai dengan namanya, energi panasbumi mengacu pada panas (di atas suhu lingkungan rata-rata) yang tersimpan di dalam bumi, dan berasal terutama dari peluruhan bahan radioaktif di kerak bumi. Secara alami, suhu bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan bertambahnya kedalaman pada sistem panasbumi bumi mengalami peningkatan panas yang *kontinyu* seiring bertambahnya kedalaman

lapisan. Perubahan suhu bumi ini biasa disebut gradien panasbumi (Suharno, 2013). Rata-rata peningkatan temperatur kerak bumi sebesar 72°F/mil atau 25°C/km, meskipun masih dimungkinkan adanya perbedaan yang besar dari satu tempat dengan tempat lainnya (Kirkland, 2010).

D. EGS (*Enhanced Geothermal System*)

EGS (*Enhanced Geothermal System*) adalah metode memanen energi dari kerak bumi dengan cara melewatkan fluida melalui zona yang ditingkatkan permeabilitasnya di batuan bawah permukaan. Peningkatan dimulai dari 1) mengebor sampai kedalaman yang cukup dimana temperature tinggi berada; 2) menciptakan permeabilitas yang cukup sehingga fluida dapat dibilas pada tingkatan yang signifikan melewati batuan panas, sasarannya mentransfer energi panas ke fluida tanpa terlalu banyak kehilangan fluida ke dalam batuan dan 3) mengekstrak energy dari fluida untuk menghasilkan listrik (Jeanloz dan Stone, 2013).

III. TEORI DASAR

A. Pemrograman MATLAB

MATLAB merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang dikembangkan oleh MathWorks dan dikhususkan untuk komputasi numerik, visualisasi dan pemrograman. Selain itu pengguna matlab dapat melakukan analisa data, mengembangkan algoritma dan membuat aplikasi. Bahasa, *tools* dan fungsi-fungsi *built-in* akan memudahkan pengguna untuk mengeksplorasi berbagai pendekatan dan memperoleh solusi dengan lebih cepat dibandingkan apabila menggunakan bahasa pemrograman tradisional seperti C/C++ atau Java. MATLAB menggunakan konsep *array/matrik* sebagai standar *variable* elemennya tanpa memerlukan

pendeklarasian *array* seperti pada bahasa lainnya. Selain itu juga diintegrasikan dengan aplikasi dan bahasa pemrograman eksternal seperti C, Java, NET dan Microsoft Excel (Kodong, 2015).

B. Metode *Single Event Determination* (SED)

Metode ini dikembangkan oleh Geiger (1912) memperkenalkan teknik iterasi *least-square* untuk determinasi hiposenter gempa. Teknik ini cukup sederhana dan relatif mudah untuk diaplikasikan. Pada prinsipnya metode ini merupakan prosedur iterasi dengan optimasi *least square* dimana kuadrat residual minimum dari waktu tempuh gelombang seismik di setiap seismometer yang digunakan.

Berdasarkan propagasi gelombang dibedakan menjadi dua jenis yaitu gelombang P dan gelombang S. Gelombang P memiliki waktu tempuh yang lebih singkat dibandingkan dengan gelombang S sehingga memiliki residual waktu kedatangan kedua gelombang. Langkah pertama adalah menebak hiposenter dan *origin time* (x_0, y_0, z_0, t_0). Dalam kasus *event* dekat atau dalam jaringan stasiun, ini dapat diselesaikan menggunakan lokasi dekat stasiun dengan waktu tiba pertama dan menggunakan waktu tiba tersebut sebagai t_0 . Untuk melinierkan masalah, sekarang diasumsikan bahwa hiposenter sebenarnya cukup dekat dengan nilai tebakan sehingga waktu tempuh residual itu di hiposenter percobaan adalah fungsi linier dari koreksi yang kita punya untuk membuat jarak hiposenter. Alur SED diperlihatkan pada **Gambar 2**.

Dimulai dari t adalah waktu tiba pertama gelombang seismik di setiap stasiun ke- i (x_i, y_i, z_i) dari hiposenter, t_{cal} adalah waktu tempuh kalkulasi berdasarkan model kecepatan 1 dimensi bawah permukaan. Waktu residual r_i untuk stasiun i adalah selisih antara waktu tiba observasi dan waktu tiba kalkulasi

yang secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$r_i = t_i^{obs} - t_i^{cal} \quad (1)$$

Pendekatan yang paling umum untuk menggunakan solusi *least squares* untuk menemukan jumlah residual kuadrat minimum e dari n observasi:

$$e = \sum_{i=1}^n (r_i)^2 \quad (2)$$

Lokasi hiposenter akan menjadi titik yang paling sesuai antara waktu kalkulasi dan observasi dengan cara e terkecil. Residual *root mean squared* (RMS) digambarkan sebagai $\sqrt{\frac{e}{n}}$. RMS diberikan dalam hampir semua program lokasi dan umumnya digunakan sebagai panduan untuk akurasi lokasi (Havskov dan Ottemoller, 2010).

Selanjutnya residual dapat dituliskan:

$$r_i = \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x_i} \Delta x + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y_i} \Delta y + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z_i} \Delta z + \Delta t \quad (3)$$

Dengan,

t_i^{tra} : waktu tempuh kalkulasi di stasiun i

$$t_i^{tra} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}{v} \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} = \frac{(x-x_i)}{v} \frac{1}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \quad (5)$$

Persamaan yang sama juga digunakan untuk y dan z .

Prosedur terdahulu untuk sumber di lapisan kedua bisa disamaratakan untuk sumber di lapisan yang lebih dalam, sebut saja di lapisan ke- j . Turunan spasial dari waktu tempuh di sumber untuk kasus ini adalah

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} = -[(x_i - x)/(\Delta \cdot v_j)] \sin \phi \quad (6)$$

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y} = -[(y_i - y)/(\Delta \cdot v_j)] \sin \phi \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z} = \cos \phi / v_j \quad (8)$$

Dalam bentuk matriks kita dapat menuliskan

$$J \cdot \Delta m = \Delta d \quad (9)$$

$$[J^T] [J] \Delta m = [J^T] \Delta d \quad (10)$$

$$[\Delta m] = [J^T J]^{-1} J^T \Delta d \quad (11)$$

Dengan elemen penyusun matriks sebagai berikut:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial x} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial y} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial z} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Delta m = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Delta d = \begin{bmatrix} r_1 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Dimana matriks J berupa matriks kernel (jacobian), bersisi derivative parsial residual waktu tempuh tiap stasiun terhadap parameter hiposenter berukuran $n \times 4$, dengan n adalah jumlah stasiun pengamat dan 4 adalah representasi jumlah parameter hiposenter yang dicari. Matriks Δm adalah model yang diinginkan dan Δd merupakan matriks residual berisikan parameter residual waktu tiba yang diperoleh dari data. Sehingga didapatkan perkiraan koordinat setelah dikoreksi, diberikan oleh persamaan:

$$X_0 + \Delta x = x \quad (15)$$

$$Y_0 + \Delta y = y \quad (16)$$

$$Z_0 + \Delta z = z \quad (17)$$

$$t_0 + \Delta t = t \quad (18)$$

Proses inversi jacobian dilakukan untuk mendapatkan matriks yang representasi dari nilai yang diinginkan. Proses inversi ini dilakukan dengan iterasi yang terus menerus untuk mendapatkan nilai konvergen sehingga nilai residual waktu t_{obs} dan t_{cal} mendekati 0.

Untuk solusi inversi linier teredam (*damped linier inversion*) sebagai berikut:

$$\Delta m = [J^T J + \epsilon^2 I]^{-1} J^T \Delta d \quad (19)$$

Penggunaan istilah redaman atau *damping* untuk estimasi parameter model sebagaimana dinyatakan oleh persamaan (19) berasosiasi dengan proses “meredam” ketidak-stabilan yang mungkin timbul akibat keterbatasan data pada inversi yang termasuk *under-determined*.

Secara matematis penambahan suatu bilangan relative kecil ϵ^2 pada setiap elemen diagonal matrik $[J^T J]$ seperti

terlihat pada persamaan (19) dapat menstabilkan proses inversi matriks (misalnya menggunakan algoritma eliminasi Gauss-Jordan) dilakukan prosedur *pivoting* yaitu membagi setiap baris matriks dengan elemen diagonalnya. Tujuan prosedur *pivoting* adalah untuk memperoleh elemen diagonal berharga satu yang kemudian digunakan untuk mengeliminasi elemen pada baris lainnya. Jika elemen diagonal sangat kecil atau mendekati nol maka proses *pivoting* akan menghasilkan bilangan yang sangat besar dan proses inverse menjadi tidak stabil. Dengan kata lain parameter ϵ^2 berfungsi meredam ketidakstabilan proses inversi matriks tersebut.

Faktor redaman ϵ^2 yang sering disebut pula sebagai *regularization parameter* harus dipilih sedemikian rupa sehingga menyatakan perimbangan atau kompromi antara masing-masing faktor yang diminimumkan. Pada umumnya ϵ^2 ditentukan secara coba-coba (*trial and error*) kemudian melalui mekanisme tertentu dipilih diantara beberapa harga ϵ^2 dengan menerapkan salah satu dari kriteria berikut:

1. Norm model minimum dengan kesalahan prediksi data yang masih berada di bawah harga tertentu, $E = \|e\|^2 \leq \delta$.
2. Kesalahan prediksi data minimum dengan norm model $L = \|m\|^2 \leq \lambda$.

Harga L menurun sebagai fungsi ϵ^2 , sementara E meningkat sesuai peningkatan ϵ^2 . Plot harga L dan E untuk beberapa harga ϵ^2 (biasanya dalam skala log-log) menghasilkan kurva berbentuk “L” yang disebut *trade-off curve* yang dapat digunakan untuk menentukan harga ϵ^2 (Grandis, 2009).

Ketika metode iterasi digunakan, perhitungan harus dihentikan di titik tertentu. Pada penelitian ini, proses perhitungan iterasi akan berhenti ketika:

$$\delta d < \epsilon \quad (20)$$

$$\delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (21)$$

Dengan δd vektor koreksi dan ϵ adalah toleransi ($\epsilon > 0$) (Maochen, 2003).

C. Poisson's Ratio

Pada dasarnya *poisson's ratio* didefinisikan dengan rasio regangan tegak lurus terhadap jenis gaya deformasi dalam arah gaya itu sendiri. Dapat juga didefinisikan sebagai perbandingan kecepatan gelombang kompresi dengan kecepatan gelombang transversal (Mavko dkk., 2003).

$$PR = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (22)$$

$$PR = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]} \quad (23)$$

Dimana PR adalah *poisson's ratio*, V_p adalah kecepatan gelombang kompresi dan V_s adalah kecepatan gelombang transversal.

Poisson's ratio dapat diperkirakan dengan memeriksa waktu perjalanan relatif gelombang kompresi dan transversal dari *event* gempa mikro yang terekam pada beberapa stasiun (Foulger, 1982). Dilakukan pengukuran *poisson's ratio* di laboratorium terhadap batu pasir kering dan jenuh air dari Lapangan Panasbumi Cerro Prieto dengan nilai 0,1 untuk kering dan 0,3 untuk sampel basah (Somerton, 1978). Nilai *poisson's ratio* untuk Lapangan Panasbumi Geyser dengan metode seismik pasif diperoleh nilai 0,15 sampai 0,2 dalam zona produksi dan nilai-nilai yang lebih tinggi di luar zona itu. Rendahnya nilai yang diperoleh dianggap mencerminkan dominasi uap dari batuan reservoir (Majer dan Evilly, 1979). Pada daerah dominasi uap, nilai *poisson's ratio* yang dominan adalah rendah. Nilai *poisson's ratio* lebih rendah dari 0,25 untuk daerah dominasi uap sedangkan pada sistem panasbumi dominasi air, maka nilai *poisson's ratio* lebih besar dari 0,25 (Silitonga dan Suroso, 2005).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

A. Perangkat Lunak dan Data Penelitian

Perangkat lunak yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. *Software* MATLAB versi 2013 untuk membuat GUI. Data penunjang pada lapangan panasbumi lainnya (geologi dan topografi) digunakan untuk penunjang interpretasi.
- b. *Software* Surfer 11, Global Mapper dan Arc GIS untuk membuat peta lokasi dan geologi daerah penelitian.
- c. *Software* microsoft excel untuk perhitungan *poisson's ratio*.
- d. *Software* Geosoft Oasis Montaj 8.3, digunakan untuk memodelkan nilai *poisson's ratio*.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog gempa mikro Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum EGS (September 2008 hingga Agustus 2010) dan sesudah EGS (Maret 2013 hingga Februari 2015). Sumber data dari *Northern California Earthquake Data Center* (NCEDC) dan merupakan data sekunder yang meliputi waktu tiba gelombang P dan S, posisi stasiun serta model kecepatan 1 dimensi.

B. Diagram Alir

Secara umum, penelitian ini terdiri dari penentuan hiposenter dan *poisson's ratio*. Berikut ini adalah tahap-tahap yang dilakukan:

1. Penentuan hiposenter menggunakan metode SED dengan data awal berupa waktu tiba gelombang P dan S, model kecepatan 1 dimensi dan lokasi stasiun (UTM X, UTM Y dan elevasi).
2. Penentuan *poisson's ratio* menggunakan diagram wadati dengan data awal berupa selisih antara waktu tiba gelombang P dan S dengan *origin time*.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Program Penentuan Hiposenter

Program penentuan hiposenter yang dikembangkan penulis sudah berbasis GUI sehingga pemakaian menjadi mudah. Program ini terdiri dari dua *file* yang

berkesantensi .fig dan .m dengan ukuran 21KB dan 260KB. Program ini dijalankan dengan Matlab dengan cara sebagai berikut.

1. Buka Matlab, lalu ketikkan “*guide*” di *command window*.
2. Pilih Open Existing GUI, lalu pilih GUI1.fig. Kemudian pilih *open*.
3. Menjalankan fig file dapat dilakukan dengan cara klik tombol *run figure* atau (Ctrl+T).
4. Dalam program ini terdapat beberapa *input* yang harus diisi sehingga program dapat dijalankan. Input yang harus dilakukan pengguna yaitu, jumlah stasiun, koordinat stasiun (x, y, z), waktu tiba gelombang primer (tp), waktu tiba gelombang sekunder (ts), kecepatan gelombang primer (vp), kecepatan gelombang sekunder (vs), kedalaman lapisan (dl), hiposenter awal dan *origine time* (t0) awal.
5. Setelah semua data *input* selesai, maka klik *run*. Selain untuk menentukan hiposenter gempa, program ini juga menentukan *origine time*, RMS, eror x, eror y, eror z dan eror *origine time*. Berikut ini adalah tampilan program penentuan hiposenter pada **Gambar 3**.

B. Hiposenter

Penentuan lokasi hiposenter merupakan hal yang penting dalam analisis persebaran *event*. Berikut ini merupakan hasil lokasi episenter gempa mikro sebelum EGS yang ditampilkan pada **Gambar 4** dengan jumlah *event* gempa mikro sebanyak 99. *Event* gempa sebelum EGS menyebar mengikuti arah dari Sesar *Ridge Rhyolite*.

Sebaran hiposenter penampang utara-selatan diperlihatkan pada **Gambar 5**. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa elevasi *event* bervariasi dari -1000 m sampai 1400 m. Namun umumnya sebaran *event* berkumpul di elevasi 0m, 500m dan 1000m. Elevasi 0m berada di Batuan Lumpur dan pada sumur 27-15 berada di Batuan Pre-Terseier yang mempunyai patahan. Elevasi 500 m berada dibagian

bawah Batuan Ryolite Bawah yang berbatasan dengan Batuan Pre-Tersier Atas dan banyak terdapat rekahan-rekahan berdasarkan banyaknya zona *lost circulation* di sumur 21-2, 27-15 dan 74-21. Sedangkan elevasi 1000m berada di Batuan Dasit dan banyak terdapat rekahan-rekahan berdasarkan adanya zona *lost circulation* di sumur 27-15.

Sebaran hiposenter hasil penampang timur-barat diperlihatkan pada **Gambar 6**. Umumnya sebaran *event* berkumpul di elevasi 0m, 500m dan 1000m. Elevasi 0m berada di Batuan Lumpur, elevasi 500m berada di bagian bawah Batuan Riolit Bawah yang berbatasan dengan Batuan Pre-Tersier Atas, dan elevasi 1000m berada di Batuan Dasit pada sumur 74-21 dan semakin ke timur berada di Batuan Riolit Atas.

Gambar 7, menunjukkan grafik RMS tiap *event*. Semua nilai RMS kurang dari 1. Untuk grafik eror tiap *event* diperlihatkan pada **Gambar 8**. Nilai eror yang ditampilkan merupakan rata-rata dari eror x, y dan z. Semua nilai eror kurang dari 1.

Hasil lokasi episenter gempa mikro sesudah EGS yang ditampilkan pada **Gambar 9**. Sesudah dilakukannya EGS, sebaran *event* tetap berada di Sesar *Ridge Rhyolite* dan menyebar mengikuti arah dari sesar tersebut. Dibandingkan dengan sebaran hiposenter sebelum EGS, sebaran hiposenter setelah EGS lebih terpusat di antara sumur EGS sampai sumur produksi. Gempa mikro yang terekam setelah EGS dua kali lebih banyak dibandingkan sebelum EGS, berjumlah 186 *events*.

Sebaran hiposenter penampang utara-selatan diperlihatkan pada **Gambar 10**. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa elevasi *event* bervariasi dari -1000 m sampai 1400 m. Namun umumnya sebaran *event* berkumpul di elevasi 0m, 500m dan 1000m. Elevasi 0m berada di Batuan Lumpur dan pada sumur 27-15 berada di Batuan Pre-Terseier yang mempunyai patahan. Elevasi 500 m berada dibagian bawah Batuan Ryolite Bawah yang

berbatasan dengan Batuan Pre-Tersier Atas dan banyak terdapat rekahan-rekahan berdasarkan banyaknya zona *lost circulation* di sumur 21-2, 27-15 dan 74-21. Sedangkan elevasi 1000m berada di Batuan Dasit dan banyak terdapat rekahan-rekahan berdasarkan adanya zona *lost circulation* di sumur 27-15. Penambahan *event* terlihat paling banyak berada di elevasi 500 yang merupakan daerah target stimulasi EGS.

Sebaran hiposenter penampang timur-barat diperlihatkan pada **Gambar 11**. Umumnya sebaran *event* berkumpul di elevasi 0m, 500m dan 1000m. Elevasi 0m berada di Batuan Lumpur, elevasi 500m berada dibagian bawah Batuan Riolit Bawah yang berbatasan dengan Batuan Pre-Tersier Atas, dan elevasi 1000m berada di Batuan Dasit pada sumur 74-21 dan semakin ke timur berada di Batuan Riolit Atas. Sama dengan penampang utara-selatan, penambahan *event* terlihat paling banyak berada di elevasi 500 yang merupakan daerah target stimulasi EGS.

Gambar 12, menunjukkan grafik RMS tiap *event*. Semua nilai RMS hasil pengolahan kurang dari 1. Untuk grafik eror tiap *event* diperlihatkan pada **Gambar 13**. Nilai eror yang ditampilkan merupakan rata-rata dari eror x, y dan z. Semua nilai eror hasil pengolahan kurang dari 1.

C. Poisson's Ratio

Penentuan nilai *poisson's ratio* dari pengolahan data gempa mikro hasil pengolahan *software* Matlab dengan *source code* yang dikembangkan oleh penulis dilakukan dengan menggunakan diagram wadati. Nilai *gradient* pada diagram wadati Gambar 38, adalah 0,906 dengan nilai R^2 sebesar 0,955. Nilai R^2 adalah koefisien korelasi hubungan antara data Tpo dan Tsp. Sedangkan nilai vp/vs adalah 1,906 untuk diagram wadati di **Gambar 14**. Data vp/vs yang didapat digunakan untuk mencari nilai *poisson's ratio*.

Nilai *poisson's ratio* kemudian dimodelkan secara 3 dimensi. **Gambar 15**, merupakan model 3 dimensi sebaran *poisson's ratio* sebelum EGS. Sedangkan **Gambar 16**, merupakan model 3 dimensi sebaran *poisson's ratio* sesudah EGS. Nilai *poisson's ratio* sebelum stimulasi EGS sebesar 0,067 sampai 0,477, sedangkan sesudah dilakukan stimulasi EGS sebesar 0,083 sampai 0,467. Warna biru tua menunjukkan nilai kurang dari 0.15 yang berarti batuan kering, warna biru muda menunjukkan nilai 0.15 sampai 0.25 yang berarti uap, sedangkan warna hijau sampai merah muda menunjukkan nilai diatas 0,25 yang berarti air, dimana semakin tinggi nilai *poisson's ratio* semakin banyak kandungan fluidanya.

Berdasarkan model 3 dimensi *poisson's ratio* sebelum dan sesudah EGS, lapangan panasbumi desert peak memiliki sebaran nilai *poisson's ratio* yang bervariasi. Umumnya area reservoir lapangan panasbumi desert peak memiliki nilai *poisson's ratio* tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa lapangan panasbumi desert peak memiliki sistem dominasi air. Pada **Gambar 17**, terdapat warna biru tua di area EGS yang menunjukkan batuan kering. Batuan kering inilah yang menjadi target EGS dalam meningkatkan permeabilitas sehingga fluida dari area injeksi dapat melalui area batuan kering tersebut. Pada **Gambar 18**, terlihat warna biru tua yang ada di area EGS ketika sebelum EGS berubah menjadi warna (merah, kuning dan hijau). Batuan kering ini menjadi batuan basah yang berarti meningkatnya permeabilitas sehingga fluida dari area injeksi dapat melalui area batuan kering tersebut.

Selanjutnya dibuat penampang horisontal pada model 3 dimensi sebaran *poisson's ratio*. Penampang horisontal ini dibuat pada elevasi 500 m dimana di elevasi tersebutlah area EGS berada. Pada **Gambar 19**, terdapat warna biru tua di area EGS yang menunjukkan batuan kering. Batuan kering inilah yang menjadi target EGS dalam meningkatkan permeabilitas

sehingga fluida dari area injeksi dapat melalui area batuan kering tersebut. Pada **Gambar 20**, terlihat warna biru tua yang ada di area EGS ketika sebelum EGS berubah menjadi warna (merah, kuning dan hijau). Batuan kering ini menjadi batuan basah yang berarti meningkatnya permeabilitas sehingga fluida dari area injeksi dapat melalui area batuan kering tersebut.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Penentuan hiposenter gempa mikro berhasil dilakukan menggunakan program GUI di MATLAB yang dikembangkan penulis.
2. Sebaran hiposenter gempa mikro sebelum dan sesudah stimulasi EGS mengikuti alur sesar *ridge rhyolite* yang merupakan lokasi utama Lapangan Panasbumi Desert Peak. Sesudah dilakukannya stimulasi EGS sebaran gempa mikro meningkat 2 kali, dengan peningkatan paling tinggi berada di elevasi 500m (zona stimulasi EGS).
3. Terjadi peningkatan nilai *poisson's ratio* sesudah dilakukan stimulasi EGS terutama di elevasi 500m (zona stimulasi EGS). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan saturasi air di area EGS sesudah stimulasi EGS.

A. Saran

Perlu dilakukannya penentuan faktor *damping* yang optimal sehingga ketidakstabilan dalam proses inversi dapat diredam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Northern California Earthquake Data Center (NCEDC) yang telah mengizinkan penulis untuk menggunakan data penelitian. Ucapan terimakasih pula kepada segenap dosen pembimbing serta seluruh pihak yang membantu penelitian dan penulisan jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Benoit, W.R., Hiner, J.E. dan Forest, R.T. 1982. *Discovery and Geology of the Desert Peak Geothermal Field: A Case History*. University of Nevada.
- Ethan, C. dan Ezra, Z. 2013. Desert Peak EGS Project. U. S. Department of Energy.
- Foulger, G. 1982. Geothermal Exploration and Reservoir Monitoring Using Earthquakes and the Passive Seismic Method. *Geothermics*. 11(4), pp. 259-268.
- Foulger, G.R. dan Long, R.E. 1984. Anomalous Focal Mechanism; Tensile Crack Formation on an Accreting Plate Boundary. *Nature*. 310:43-45.
- Gei, D., Eisner, L. dan Suhadolc, P. 2010. Passive Seismic Analysis For Reservoir Monitoring. *QUEST Publications*. Sardinia, Italia.
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. ITB. Bandung.
- Jeanloz, H.R. dan Stone. 2013. *Enhanced Geothermal System*. The Mitre Corporation. Virginia.
- Kirkland, K. 2010. *Earth Science: Notable Research and Discoveries*. Infobase Publishing.

Kodong, F.R. 2015. Aplikasi *Autoreply SMS* Menggunakan Pemrograman Matlab. *Jurnal Telematika*. Vol. 12.

Majer, E.L. dan Mc. Evilly, T.V. 1979. Seismological Investigations at the Geysers Geothermal Field. *Geophysics*. 44. 246-269.

Maulida, N.H. 2015. Memantau Aktivitas Sistem Panasbumi Dengan Metode Mikroseismik. (Essai).

Maochen, G.E. 2003. Analysis of Source Location Algorithms Part II: Iterative methods. *Journal of Acoustic Emission*. 21. 29-51. USA.

Mavko, G., Mukerji, T. dan Dvorkin, J. 2003. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous*

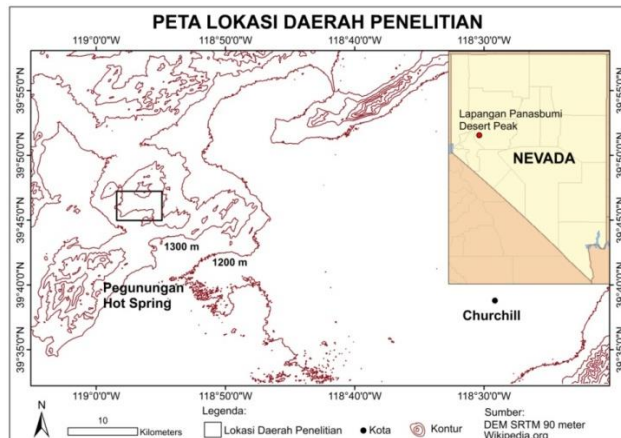
Media. Cambridge University Press. ISBN 0 521 54344 4.

Silitonga dan Suroso. 2005. A Poisson's Ratio Distribution From Wadati Diagram as Indicator of Fracturing of Lahendong Geothermal Field, North Sulawesi, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. 1-5.

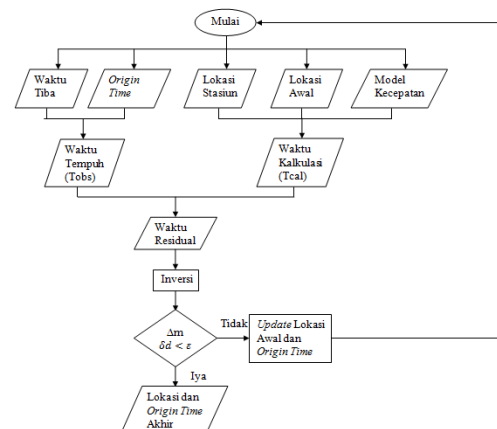
Somerton, W.H. 1978. Some Physical Properties of Cerro Prieto Cores. *Proc. First Symp. Cerro Prieto Geothermal Field*. Lawrence Berkeley Laboratory. Berkeley. LBL-7098.

Suharno. 2013. *Eksplorasi Geothermal*. Lembaga Penelitian Universitas Lampung. Lampung.

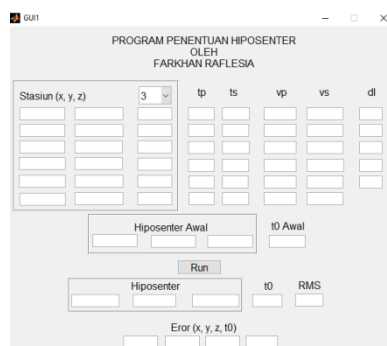
LAMPIRAN



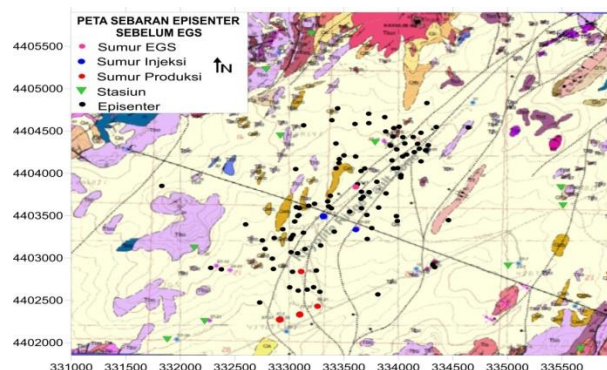
Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian



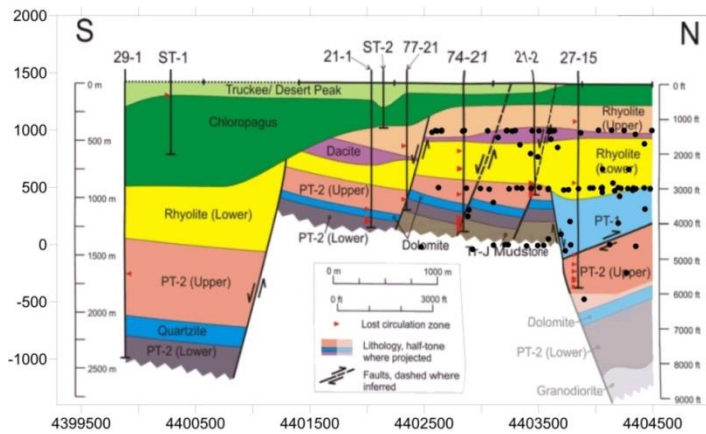
Gambar 2. Alur SED



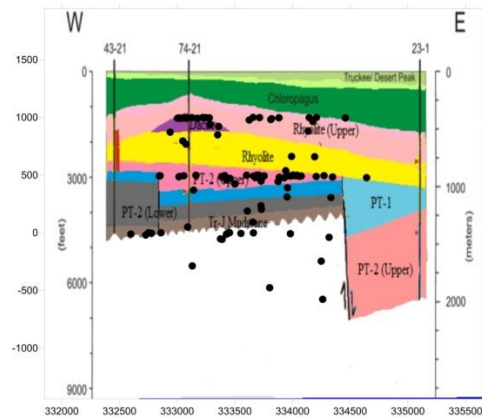
Gambar 3. Program penentuan hiposenter



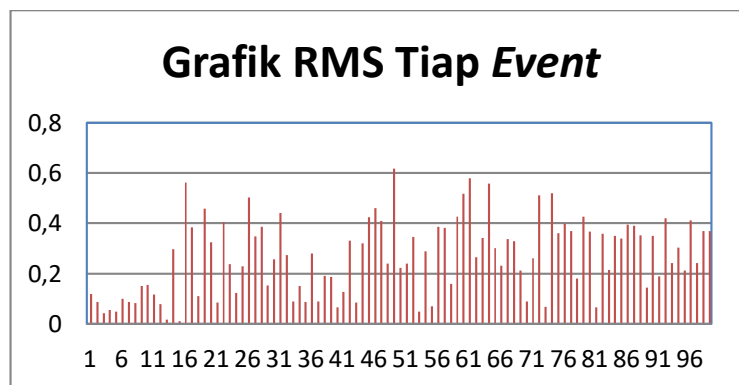
Gambar 4. Sebaran episenter sebelum EGS



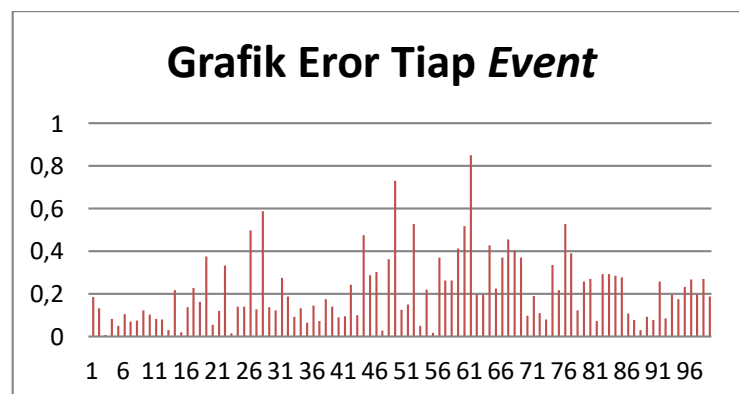
Gambar 5. Sebaran hiposenter sebelum EGS S-N



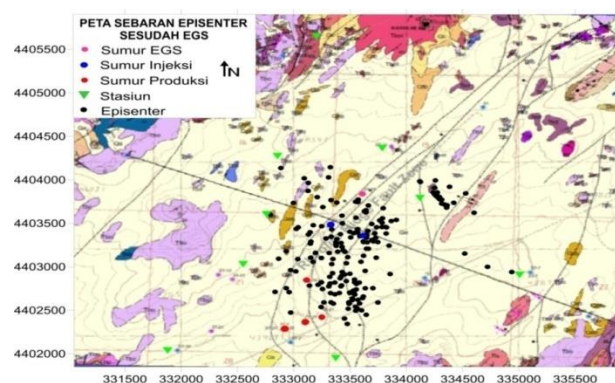
Gambar 6. Sebaran hiposenter sebelum EGS W-E



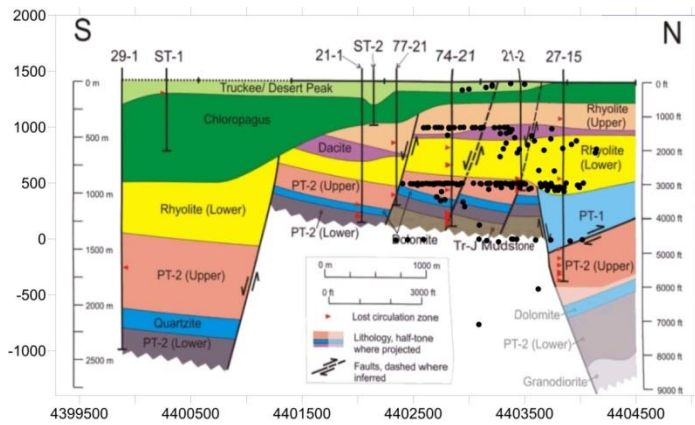
Gambar 7. Grafik RMS sebelum EGS



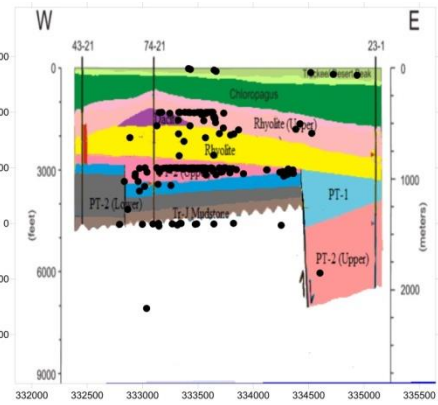
Gambar 8. Grafik error sebelum EGS



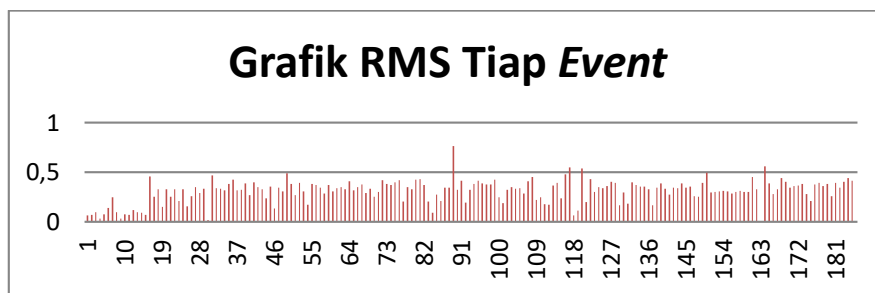
Gambar 9. Sebaran episenter sesudah EGS



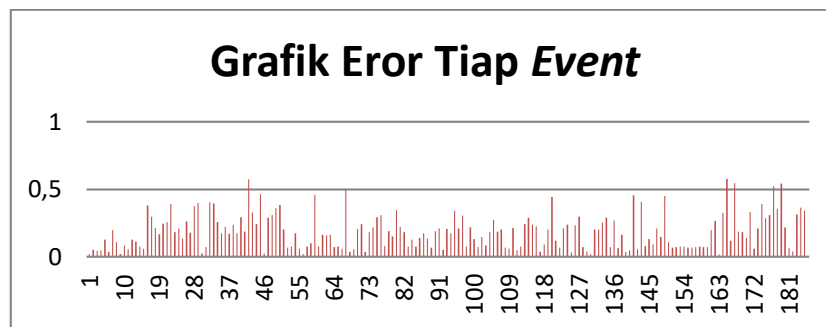
Gambar 10. Sebaran hiposenter sesudah EGS S-N



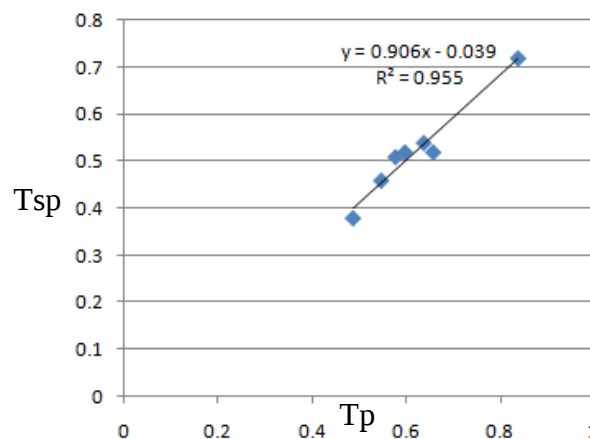
Gambar 11. Sebaran hiposenter sesudah EGS W-E



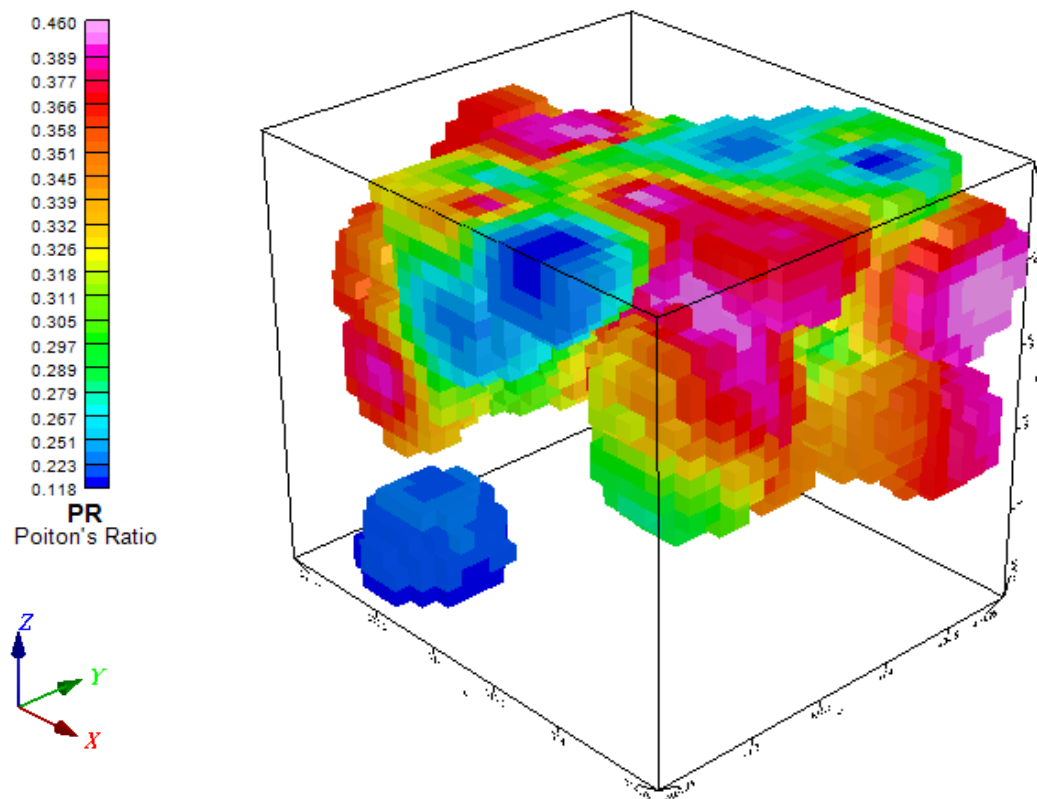
Gambar 12. Grafik RMS sesudah EGS



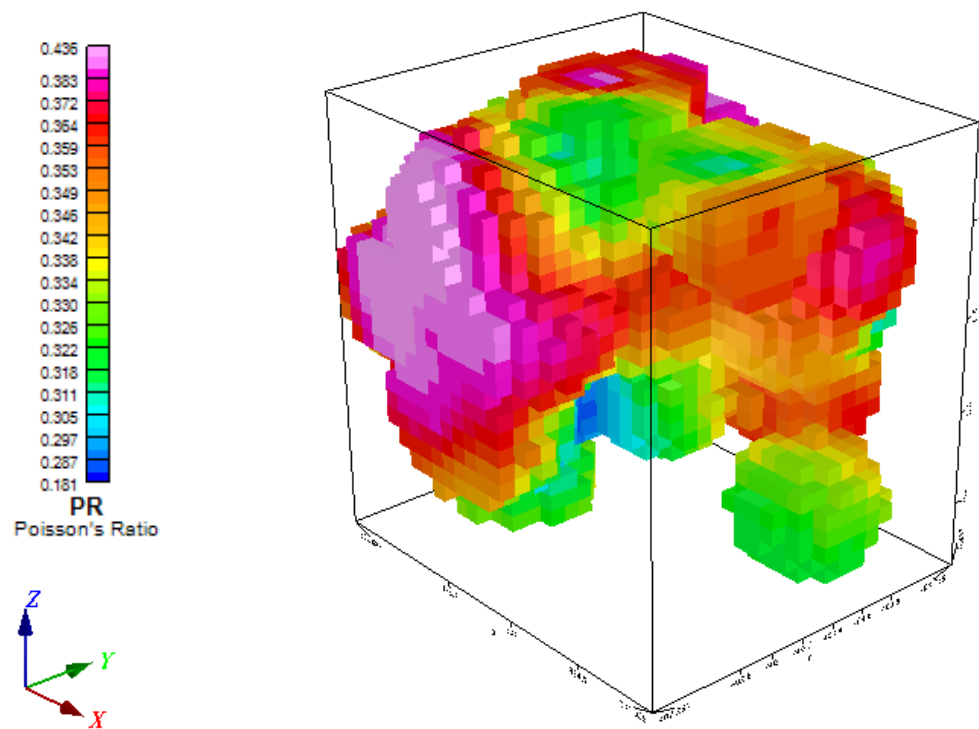
Gambar 13. Grafik error sesudah EGS



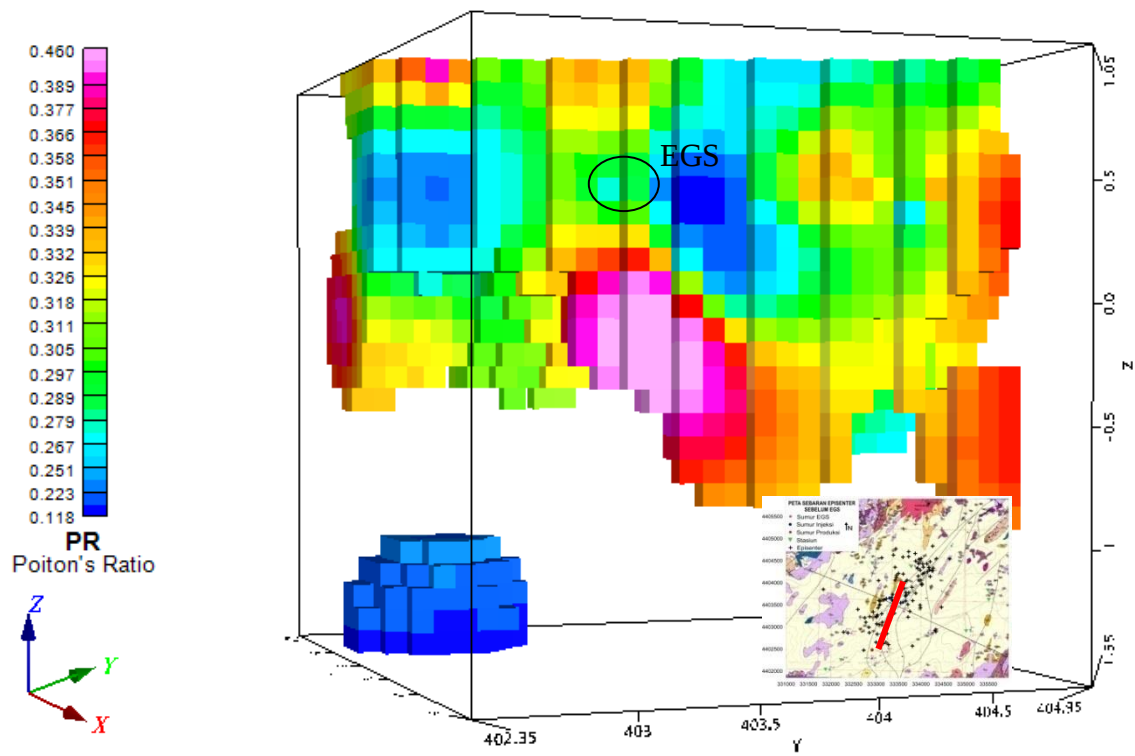
Gambar 14. Diagram Wadati hasil penelitian



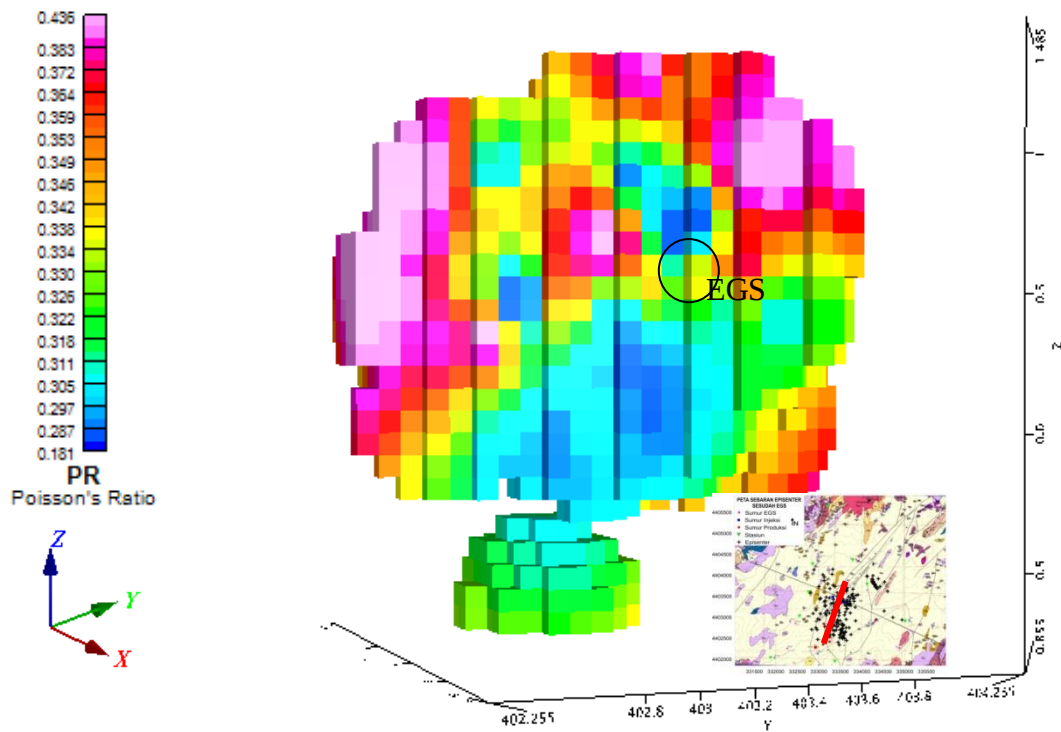
Gambar 15. Model 3 dimensi sebaran *poisson's ratio* sebelum EGS



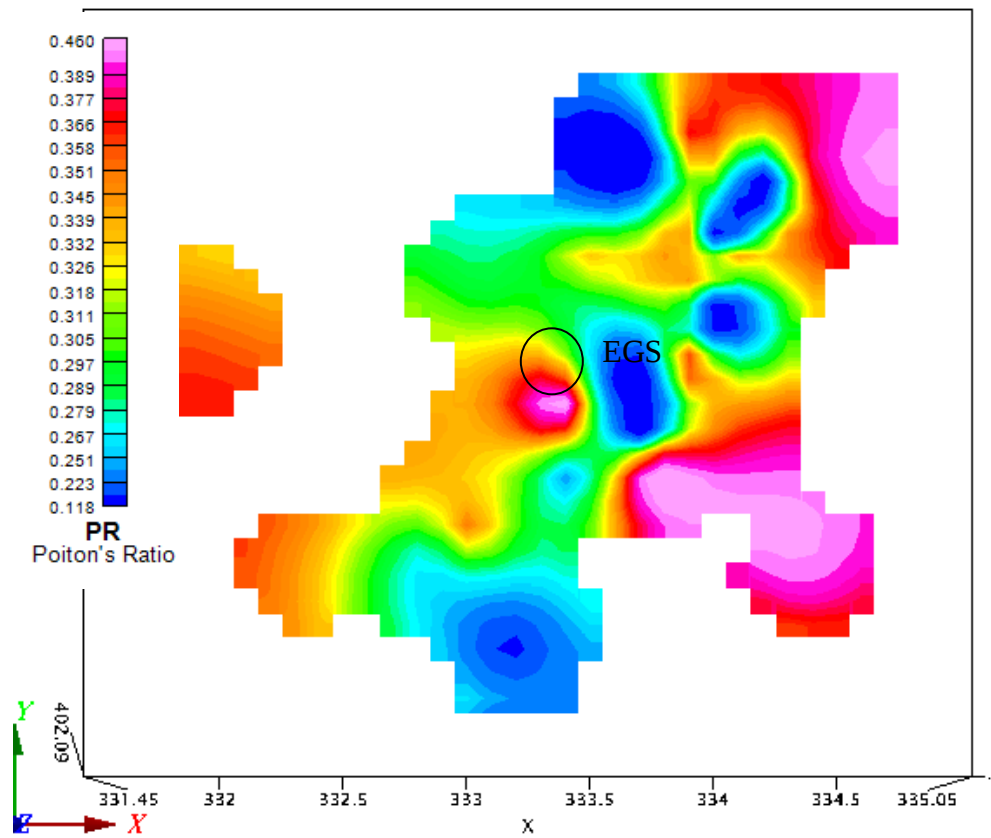
Gambar 16. Model 3 dimensi sebaran *poisson's ratio* sesudah EGS



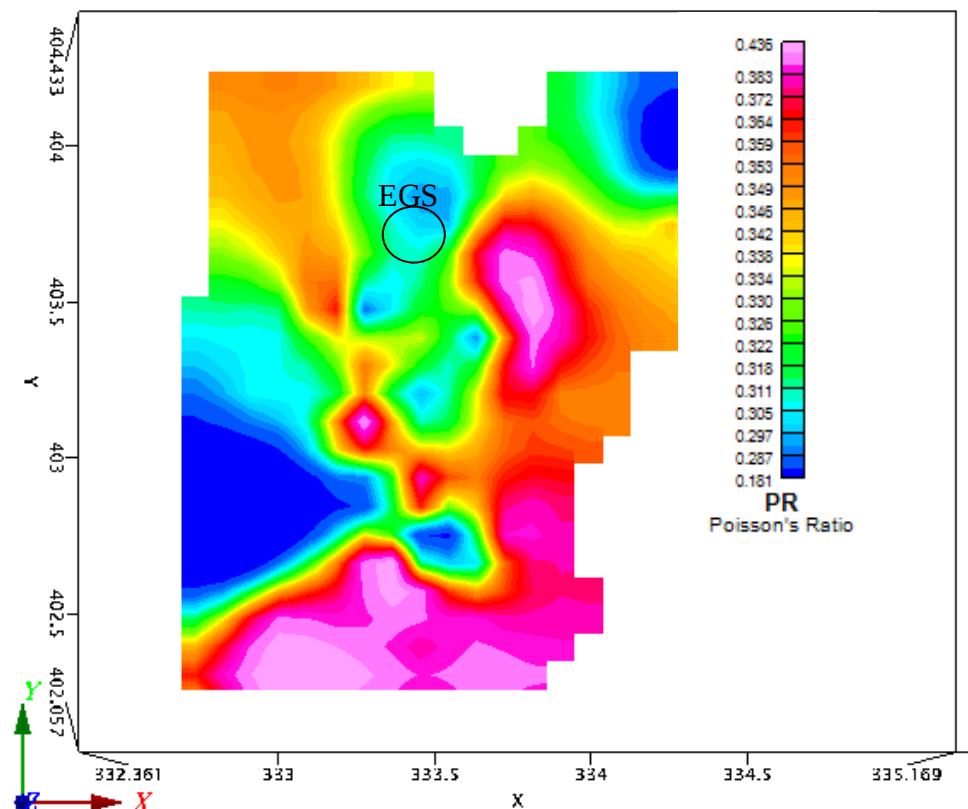
Gambar 17. Penampang vertikal sebelum EGS



Gambar 18. Penampang vertikal sesudah EGS



Gambar 19. Penampang horizontal elevasi 500 m sebelum EGS



Gambar 20. Penampang horizontal elevasi 500 m sesudah EGS