

# ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO DAN *POISSON'S RATIO*, STUDI KASUS: *HYDROSHEARING* PADA LAPANGAN *ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM* NEWBERRY, OREGON

Aji Setiawan<sup>1\*</sup>, Rustadi, Ahmad Zaenudin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Email : [ajisetiawan1711@gmail.com](mailto:ajisetiawan1711@gmail.com)<sup>1\*</sup>

## ABSTRAK

Teknologi *Enhanced Geothermal System (EGS)* yang diterapkan pada lapangan panas bumi bertipe *hot dry rock* di Newberry dilakukan dengan menginjeksikan sejumlah air dingin bertekanan tinggi sehingga dihasilkannya reservoir buatan atau yang disebut *hydroshearing*. Pengamatan dilakukan dengan merekam *event* gempa mikro menggunakan 15 seismometer yang dipasang selama proses *EGS*, yaitu sejak Oktober 2012 hingga Desember 2014. Penelitian bertujuan untuk memetakan hiposenter gempa mikro yang terjadi akibat proses *fracturing*, menghasilkan nilai sebaran *poisson's ratio* untuk mengkarakterisasi fluida lapisan berpori dan menghasilkan model *artificial reservoir* produk *EGS*. Digunakan metode *Single Event Determination (SED)* dan *Clustering* untuk mendapatkan *origin time* dan lokasi hiposenter dari *input* berupa *waveform* hasil perekaman. Hasil yang didapat menunjukkan metode *Clustering* memberikan nilai *RMS* dan *error* lokasi yang jauh lebih kecil serta pola distribusi *event* yang lebih baik. Hasil penelitian menunjukkan *event* tersebar menjadi 2 *cluster* utama yang dipengaruhi oleh fase injeksi. Adapun *poisson's ratio* dihitung menggunakan hasil diagram Wadati berupa nilai  $V_p/V_s$ . Parameter fisis *poisson's ratio* yang mengarakterisasi keberadaan dan tipe fluida serta indeks kebasahan menghasilkan 3 zona utama yang terdiri dari zona jenuh air yang berada pada kedalaman relatif dangkal dan teridentifikasi karena adanya kebocoran casing sumur, kemudian zona uap dan zona dominasi air yang berada pada area target (kedalaman  $\geq 1970$  meter). Berdasarkan analisis diketahui zona dominasi air berada pada kedalaman 2006,5 – 3300 meter dengan nilai *poisson's ratio* berkisar 0,3 sampai 0,44 yang diestimasi memiliki volume 1,59 km<sup>3</sup> dengan pola rekahan yang berarah Tenggara, Selatan dan Barat-Daya dari sumur injeksi.

## ABSTRACT

Enhanced Geothermal System (EGS) technology applied to the hot dry rock geothermal fields in Newberry is done by injecting a high pressured of cold water to produce an artificial reservoir, called hydroshearing. The observations were conducted by recording microearthquake events using 15 seismometers installed during the EGS process, from October 2012 to December 2014. The study purposed to identified microearthquake hypocenter caused by fracturing process, determining poisson's ratio distribution values for fluid characterization in porous layer and defining artificial reservoir model of EGS products. Single Event Determination (SED) and Clustering methods are used to obtain the origin time and hypocenter location from recorded waveform as input. The result shows Clustering method gives RMS value and error location much smaller and also better for event distrubution pattern. The results showed the events diveded into 2 main clusters that were affected by the injection phases. The poisson's ratio is calculated using  $V_p/V_s$  value from Wadati diagram. The physical parameters of poisson's ratio characterizing the fluid existance, fluid type and wettability index resulted in 3 major zones consisting of water saturation zone at relatively shallow depth and identified due to leakage of well casing, then vapor zone and water dominance zone located on the target area (depth  $\geq 1970$  meters) . Based on the analysis, it is known that the dominant zone of water at depth of 2006.5 - 3300 meters with poisson's ratio value ranging from 0.3 to 0.44 which is estimated to have a volume of 1.59 km<sup>3</sup> with fractures direction in Southeast, South and Southwest from injection wells.

**Keywords:** *EGS, hydroshearing, microearthquake, SED, Clustering, hypocenter, poisson's ratio, artificial reservoir.*

## 1. PENDAHULUAN

Energi panas bumi merupakan salah satu solusi pemenuhan kebutuhan energi bebas emisi dan bersifat *renewable* atau dapat diperbaharui. Pada umumnya pembangkit listrik tenaga panas bumi memanfaatkan fluida yang berasal dari sistem panas bumi di bawah permukaan (*hydrothermal system*), namun beberapa kasus terdapat berbagai lapangan yang juga memiliki sistem panas bumi namun tidak memiliki siklus hidrologi yang memadai. Hal tersebut ditandai oleh kondisi tektonik yang berada pada jalur subduksi, berasosiasi dengan gunung api purba dan memiliki gradien suhu yang tinggi atau lebih dikenal dengan *hot dry rock system*.

Sejumlah penelitian yang telah dilakukan di area kaldera hasil erupsi gunung api *Newberry* mengindikasikan potensi panas bumi bertipe *hot dry rock system* dengan gradien rata-rata suhu 130°C/km (Frone dkk, 2014) namun masih belum dimanfaatkan. Hal tersebut juga diketahui berdasarkan sumur eksplorasi dimana lapisan pada *zone of interest* memiliki permeabilitas dan saturasi yang rendah (*dry hole*) (Cladouhos dkk., 2013). Sehingga diperlukannya teknologi untuk memanfaatkan potensi tersebut.

*Enhanced Geothermal System (EGS)* merupakan teknologi yang diterapkan pada lapangan panas bumi *Newberry* menggunakan teknik *hydroshearing* yang dilakukan dengan menginjeksikan air dingin yang berasal dari akuifer air tanah sehingga dapat menghubungkan masing-masing rekahan (*connecting fracture*) untuk meningkatkan permeabilitas reservoir dan sebagai fluida pengisi lapisan berpori.

Proses injeksi air bertekanan tinggi secara simultan pada proses *EGS* akan mengakibatkan terbentuknya sejumlah rekahan yang juga melepaskan energi dalam bentuk gempa mikro. Dengan mengetahui distribusi *event* gempa mikro

dapat diketahui hasil rekahan yang terbentuk.

Penelitian ini berfokus pada pengamatan proses dari tiga tahap *hydroshearing* menggunakan data gempa mikro sejak Oktober 2012 hingga Desember 2014. Perekaman *event* gempa mikro dilakukan dengan menggunakan 15 stasiun pengamat yang terdiri dari 7 *surface station* dan 8 *borehole station*. Adanya *event* gempa mikro mengindikasikan keberadaan deformasi hasil injeksi, sehingga dapat diketahui pola rekahan serta sebaran fluida injeksi berdasarkan nilai *poisson's ratio* yang diperlukan untuk mengetahui batas area reservoir hasil *EGS* dan dapat menjadi acuan eksplorasi lanjutan.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi merupakan suatu istilah umum yang menggambarkan proses perpindahan panas secara alami dalam suatu volume tertutup di kerak bumi, dimana panas berpindah dari suatu sumber panas menuju daerah pelepasan panas seperti permukaan bebas (Hochstein dan Browne, 2000). Suhu bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan bertambahnya kedalaman posisi di bawah permukaan bumi. Peningkatan suhu yang berbanding lurus dengan bertambahnya kedalaman disebut sebagai "gradient geothermal" (Suharno, 2013) dengan rata-rata peningkatan suhu sebesar 25°C/km (Kirkland, 2010).

Terdapat beberapa jenis sistem panas bumi, secara umum diklasifikasikan menjadi empat kategori, yaitu *Hydrothermal System*, *Geopressured System*, *Hot Dry Rock System* dan *Magma System* (Sanyal dan Subir, 2005). Pada *hot dry rock system*, dimana panas tersimpan pada batuan dengan porositas efektif dan permeabilitas yang rendah. Sumber panas yang tinggi dalam batuan *impermeable* berasal dari intrusi magma atau gradien

termalnya (Maulida, 2015). Pada sistem ini tidak terdapat siklus hidrotermal sehingga pemanfaatannya memerlukan injeksi fluida untuk meningkatkan permeabilitas reservoir dan sebagai fluida pengisi lapisan *porous*. Injeksi air dilakukan untuk menghasilkan rekahan buatan dimana air diinjeksikan dengan tekanan yang tinggi sehingga mengakibatkan rekahan di reservoir (Hocshtein dkk., 1992).

## 2.2 Teknologi *Enhanced Geothermal System (EGS)*

*Enhanced Geothermal System* merupakan teknologi rekayasa reservoir (DOE, 2012). Pada prinsipnya *EGS* dilakukan pada sistem panas bumi bertipe *hot dry rock*, dimana terdapat batuan bersuhu tinggi namun memiliki permeabilitas dan saturasi yang rendah karena tidak adanya siklus hidrologi yang memadai. Adapun prosesnya dilakukan dengan menginjeksikan fluida dari permukaan menuju bawah permukaan untuk menciptakan rekahan dan meningkatkan permeabilitas daerah reservoir buatan. Secara umum meliputi tiga tahap utama, yaitu identifikasi serta karakterisasi daerah panas bumi, pembuatan *artificial reservoir* dan pengoperasian *reservoir*.

## 2.3 Lapangan Panas Bumi *Newberry*

Lapangan panas bumi *Newberry* berada 35 km dari pusat kota Oregon, negara bagian Amerika Serikat yang berasosiasi dengan gunung api *Newberry*. Lapangan panas bumi ini berada di taman hutan nasional *Deschutes*. Studi bawah permukaan telah dilakukan dengan pengeboran sumur eksplorasi pada tahun 2008 yaitu *NWG 55-29* yang memiliki total kedalaman 10.000 kaki dengan temperatur yang terukur sebesar 500°F (FORGE, 2016).

Dari sumur tersebut diketahui rendahnya tingkat saturasi dan karena tidak terdapatnya siklus hidrotermal (Letvin, 2011). Injeksi melalui sumur *NWG 55-29*

dimulai sejak Oktober 2012 hingga Agustus 2014 dengan total 41.325 m<sup>3</sup> air tanah yang memiliki tekanan maksimum dari permukaan (*wellhead*) sebesar 2850 Psi (196 bar) (Cladouhos dkk., 2015).

## 2.3 *Setting Regional Newberry*

Panas bumi *Newberry* berkaitan dengan sistem gunung api *Newberry* yang terbentuk sejak 600.000 tahun lalu dengan erupsi terakhir terjadi 1300 tahun lalu (Sherrod, 1997). Sistem vulkanik ini dipengaruhi oleh zona subduksi *Cascadia* dimana lempeng *Juan De Fuca* menujam lempeng *Columbia* dengan laju penujaman 3 hingga 4,5 cm/tahun (FORGE, 2016). Geologi regional di sekitar kaldera *Newberry* terdiri atas material hasil erupsi gunung api *Newberry* (**Gambar 1**). Penelitian terpisah oleh *Establishment of the Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy* (FORGE) menghasilkan *slice B* dan *slice C* yang masing-masing ditunjukkan oleh **Gambar 2** dan **Gambar 3**.

## 2.4 Metode Gempa Mikro

Metode mikroseismik atau *microearthquake* atau metode gempa mikro adalah salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengidentifikasi adanya gempa-gempa kecil ( $\leq 3$  SR) (Hurukawa, 2008) yang umumnya disebabkan oleh simulasi hidrolik (*hydraulic fracturing*), kegiatan produksi maupun injeksi dan pengeboran. Sehingga metode gempa mikro khususnya pada eksplorasi panas bumi digunakan untuk mengamati hasil *hydraulic fracturing* maupun proses injeksi (Rutledge dan Philips, 2003), identifikasi kebocoran casing sumur (Kristiansen, 2000), pemetaan patahan (Maxwell, 1998) dan lain sebagainya.

## 2.5 Metode *Single Event Determination (SED)*

Awalnya metode ini dikembangkan untuk mendapatkan *origin time* untuk

penentuan hiposenter, yaitu waktu mulai dari terjadinya gempa. Lokasi gempa didefinisikan dengan lokasi hiposenter gempa ( $x_0, y_0, z_0$ ) dan *origin time*  $t_0$ . Hiposenter adalah lokasi fisik dari sumber gempa, biasanya diberikan dalam longitude ( $x_0$ ), latitude ( $y_0$ ), dan kedalaman di bawah permukaan ( $z_0$  [km]).

Dimulai dari  $t$  adalah waktu tiba pertama (first arrival time) gelombang seismik di setiap stasiun pengamatan (seismometer) ke- $i$  ( $x_i, y_i, z_i$ ) dari hiposenter ( $x_0, y_0, z_0$ ), adalah waktu tempuh kalkulasi berdasarkan model kecepatan 1D bawah permukaan dan  $t_0$  adalah waktu asal (*origin time*). Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$r_e = t - t_0 - t^{cal} \quad (1)$$

dimana:

- $r$  : residual,
- $t$  : *arrival time*,
- $t_0$  : *origin time*,
- $t^{cal}$  : *calculated travel time*,
- $t - t_0$  : *observed travel time* ( $t^{obs}$ ),
- $e$  : indeks stasiun pengamatan.

Fungsi matematis kuadrat terkecil (minimum) dari residual adalah:

$$F(x) = \sum_{e=1}^M r_e \quad (2)$$

Penyederhanaan dilakukan untuk menyelesaikan Persamaan diatas dengan mengasumsikan model kecepatan sudah mendekati keadaan sebenarnya dan pembacaan waktu tiba sudah tepat sehingga selisih waktu tempuh adalah fungsi linear sederhana dari selisih parameter hiposenter dugaan dan sebenarnya. Linearisasi Persamaan (2) ditulis dalam bentuk:

$$r_e = \frac{\partial T_e}{\partial x_0} dx + \frac{\partial T_e}{\partial y_0} dy + \frac{\partial T_e}{\partial z_0} dz + dt \quad (3)$$

Dimana  $x_0, y_0, z_0$  merupakan waktu tempuh gelombang hasil observasi ( $t^{obs}$ ). Dengan:

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

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

Persamaan (5) berlaku pula untuk komponen  $y$  dan  $z$ . Dalam bentuk matriks Jacobian dapat ditulis:

$$J \cdot \Delta m = \Delta d \quad (6)$$

Dimana  $J$  berisi turunan parsial waktu tempuh tiap stasiun terhadap parameter hiposenter ( $x_0, y_0, z_0$  dan  $t_0$ ) berukuran  $n \times 4$ , dimana  $n$  merupakan jumlah stasiun. Matriks  $\Delta m$  merupakan model yang dicari, berisi posisi hiposenter dan *origin time* ( $t$ ) berukuran  $4 \times 1$ . Adapun  $\Delta d$  merupakan matriks residual yang berisi parameter residual *arrival time* berukuran  $n \times 1$  (Havskov dan Ottemoller, 2010). Dengan perkalian inversi, dihasilkan matriks inversi yang masing-masing ditulis sebagai persamaan (7), (8) dan (9).

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial x} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial y} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial z} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta m = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta d = \begin{bmatrix} r_1 \\ \dots \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sehingga didapatkan:

$$X_0 + \Delta x = x, Y_0 + \Delta y = y, Z_0 + \Delta z = z, t_0 + \Delta t = t \quad (10)$$

dimana:

- $x_0, y_0, z_0, t_0$  : lokasi dan *origin time* dugaan,
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$  : selisih hiposenter dugaan hasil kalkulasi,
- $x, y, z, t$  : lokasi dan *origin time* hasil kalkulasi.

**2.6 Metode Clustering**

Prinsip yang digunakan pada metode ini ialah pengelompokan data, dimana data dikelompokkan dari yang besar ke dalam data yang lebih kecil berdasarkan kesamaan karakteristik data. Metode ini juga menggunakan prinsip yang sama dengan yang digunakan oleh metode *double difference*, yaitu menggunakan perbedaan waktu tempuh dari korelasi fase gelombang P atau gelombang S (*cross correlation*). Hal tersebut didasarkan pada beberapa kelompok *event* memiliki *waveform* yang mirip, atau disebut *multiplet*. Kemiripan tersebut disebabkan jarak antara dua *event* yang berdekatan relatif kecil dibanding jarak menuju stasiun pengamat.

Hiposenter yang saling berkaitan satu sama lain akan dikelompokkan kedalam satu cluster yang dilakukan dengan analisis koherensi antara dua waveform. Untuk asumsi ini, jarak antara dua hiposenter gempa haruslah kecil dibanding jarak antara stasiun dengan sumber (Waldhauser dan Ellsworth, 2000). Dengan asumsi tersebut selisih waktu tempuh antara kedua gempa yang terukur pada satu stasiun yang sama dapat dianggap sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter.

Perbedaan waktu tempuh antara dua gempa observasi dan kalkulasi dinyatakan dalam Persamaan (11) berikut.

$$r_{ek}^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (11)$$

Dimana *i* dan *j* merupakan dua hiposenter berjarak dekat dan *k* ialah indeks stasiun pengamat.  $t_k^i$  merupakan waktu tempuh gelombang yang berasal dari hiposenter *i* menuju stasiun *k* sedangkan  $t_k^j$  merupakan waktu tempuh gelombang yang berasal dari hiposenter *j* menuju stasiun *k*.

Mengacu pada Persamaan (6), dapat menghasilkan Persamaan berikut:

$$dre_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad (12)$$

Secara lengkap Persamaan residual (*re*) dapat ditulis sebagai berikut:

$$re = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta xi + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta yi + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta zi + \Delta t_0^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta xj - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta yj - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta zj - \Delta t_0^j \quad (13)$$

Apabila Persamaan (13) digunakan untuk semua pasangan hiposenter pada suatu *cluster* akan dihasilkan Persamaan matriks berikut:

$$WGm = Wd \quad (14)$$

W merupakan matriks diagonal untuk pemberian bobot tiap *event* berdasarkan kualitas *picking* yang juga mencerminkan *signal to noise ratio* suatu *waveform*. G merupakan matriks Jacobi berupa turunan parsial residual waktu tempuh terhadap parameter hiposenter. Matriks ini berukuran M x 4N, dimana M merupakan jumlah Persamaan yang mungkin dibentuk dari semua hiposenter di semua stasiun dan N merupakan banyaknya hiposenter dalam satu *cluster* (Sahara, dkk, 2009). Adapun *m* sama halnya dengan *SED*, yaitu vektor perubahan antar pasangan hiposenter terhadap posisi relatif hiposenter dugaan yang berukuran 4N x 1.

**2.7 Diagram Wadati dan Poisson's Ratio**

Menurut (Kisslinger dan Engdahl, 1973) diagram Wadati (Wadati, 1933) merupakan grafik waktu tiba gelombang S – gelombang P (*Ts – Tp*) sebagai sumbu Y dan waktu tiba gelombang P sebagai sumbu X yang digunakan untuk menghitung waktu kejadian gempa (*origin time*) dengan asumsi regresi linier dengan menganggap lapisan bawah permukaan yang bersifat homogen yang ditentukan dari perpotongan garis *Ts – Tp* sama dengan nol.

Dengan diagram Wadati dapat pula ditentukan nilai *Vp/Vs* dengan memasukkan nilai selisih waktu tiba (*arrival time*) gelombang P (*Tp*) dengan *origin time* (*OT*) pada sumbu X (*Tp-OT*)

dan selisih waktu tempuh (*arrival time*) gelombang S dengan gelombang P ( $T_p - T_s$ ) pada sumbu Y. Nilai  $V_p/V_s$  didapatkan dari gradien garis linier data plot. Atau secara matematis ditulis,

$$\frac{V_p}{V_s} - 1 = \frac{(T_s - T_p)}{(T_p - 0T)} \quad (15)$$

Adapun *Poisson's ratio* dihitung menggunakan persamaan (16),

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (16)$$

Acuan nilai *Poisson's ratio* pada beberapa penelitian ditunjukkan pada **Tabel 1**.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Perangkat Lunak dan Data penelitian

Terdapat beberapa perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain *Software Geopsy*, *Geiger Adaptive Damping (GAD)*, *Hypoc*, *Software* pengolah angka, pengolah peta dan pengolah data 3D.

Adapun kelengkapan data yang digunakan meliputi:

1. Data *waveform* tiga komponen hasil pengukuran 15 stasiun gempa mikro (7 *surface station* dan 8 *borehole station*) pada 29 Oktober 2012 – 15 Desember 2014 pada lapangan *EGS Newberry*, Oregon, Amerika Serikat, serta data tambahan berupa posisi stasiun, *well trajectory* dan model kecepatan 1 dimensi (**Tabel 2**). Data diperoleh dari *Lawrence Berkeley National Laboratory* dan *Department of Energy U.S (DOE US)*.
2. Data tambahan lain berupa data geologi dan topografi. Topografi daerah penelitian beserta lokasi stasiun dan sumur injeksi ditunjukkan oleh **Gambar 4**.

#### 3.2 Pengolahan Data

Meliputi beberapa tahap, antara lain sebagai berikut:

1. Pemilihan *Event* dan *Picking* Fasa  
Dilakukan dengan menyeleksi *waveform* pada 15 stasiun gempa mikro, sehingga dihasilkan data waktu tiba gelombang P dan gelombang S yang bebas *noise*. Oleh sebab itu perlu dilakukan penerapan *filter* dan penguatan amplitudo gelombang. *Event* yang dipilih minimal terekam oleh 3 stasiun.
2. Penentuan Lokasi Hiposenter  
Menggunakan metode *Geiger's Adaptive Damping (GAD)* yang dibandingkan dengan metode *hypoc*.
3. Perhitungan Koefisien *Poisson's* dan *Poisson's Ratio*
4. Analisis dan Pemodelan Volumetrik *Artificial Reservoir* Hasil *EGS*

### 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Event Gempa Mikro dan Sebaran Hiposenter

Perbedaan *input* waktu tiba gelombang dari proses *picking* akan mempengaruhi hasil perhitungan waktu tempuh (*travel time*) gelombang sehingga berdampak pada perbedaan lokasi hiposenter, waktu kejadian gempa (*origin time*) serta perhitungan *Poisson ratio*. Pada umumnya *event* akan terekam lebih dari 3 stasiun pengamat dan identifikasi fasa dilakukan pada bentuk gelombang yang sedikit *noise*.

Sehingga perlu dilakukan pemilihan *waveform* sebelum dilakukan identifikasi fasa gelombang. Stasiun *borehole* (dengan variasi kedalaman 211 sampai 288 meter dari permukaan) memberikan hasil yang lebih baik pada *event* yang lebih dalam dibanding stasiun permukaan (*surface station*). Namun dari tiga komponen arah gelombang (horizontal: N-S dan W-E serta vertikal: Z), komponen horizontal akan terbaca lebih baik menggunakan *surface station* dan komponen vertikal dengan *borehole*

*station*. Hal tersebut berkaitan dengan teknik *picking* saat identifikasi fasa dan pembacaan *arrival time*, dimana gelombang P akan lebih jelas terbaca pada komponen vertikal dan gelombang S pada komponen horizontal (Mujihardi, 2012). Perbedaan waktu tiba gelombang P dan gelombang S berkisar antara 0,14 sampai 3,74.

Metode *SED* dalam perhitungannya tidak menerapkan koreksi stasiun, yaitu jarak dan konfigurasi stasiun tidak diperhatikan. Lain halnya dengan metode *Clustering*, meskipun tidak melakukan koreksi stasiun namun menggunakan asumsi *multiplenet cluster*, yaitu dua hiposenter yang berdekatan dianggap sebagai fungsi jarak. Dengan asumsi tersebut maka selisih waktu tempuh antara kedua *event* gempa yang terekam pada stasiun yang sama dapat dianggap sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter. Dengan asumsi tersebut maka kesalahan model kecepatan dapat diminimalisir.

Pada kedua metode dilakukan perhitungan berulang (iterasi) untuk menghasilkan *output* perhitungan terbaik dengan *error* minimum. Pada metode *SED* menggunakan *GAD*, iterasi umumnya dilakukan sampai 3 kali, sedangkan metode *clustering* dengan *hypoc* melakukannya sampai 7 kali pengulangan. Adapun perbedaan lainnya dengan *SED* dalam hal pengerjaan ialah penggunaan *cluster* untuk pengelompokan *event*. Secara umum satu *cluster* didasarkan pada koherensi sinyal *waveform* pada suatu *event* dengan *event* lainnya yang umumnya memiliki rentang waktu yang berdekatan.

Perhitungan ini membagi menjadi 2 *cluster* utama berdasarkan rentang waktu terekamnya *event* disetiap periode injeksi, yang umumnya didominasi oleh *event* pada 2012 - 2013 dan 2014. Pada penelitian ini koherensi sinyal yang dianggap satu *cluster* harus lebih dari 0,4 (dengan skala 0 sampai 1). Adapun jarak maksimum episenter dengan stasiun yang melebihi 500 km akan diabaikan. Batas toleransi *event* yang dianggap berdekatan dan masuk

kedalam satu *cluster* haruslah kurang dari 10 km.

Berdasarkan pendekatan yang digunakan metode *clustering*, hasil yang didapat akan lebih akurat, karena masing-masing *event* yang berada dalam *cluster* yang sama atau selisih waktu kejadian yang relatif dekat kemungkinan berasal dari mekanisme (sumber) gempa yang sama. Sehingga pola sebaran hiposenter yang dihasilkan tidak akan terlalu *random*. Lain halnya dengan metode *SED* yang perhitungannya dilakukan berdasarkan inisiasi (dugaan) lokasi hiposenter tanpa adanya koreksi stasiun, maka *event* yang memiliki selisih waktu tiba gelombang yang mirip justru akan ditampilkan sebagai suatu *event* gempa yang sama. Perbandingan hasil keduanya berdasarkan *RMS* dan *error* lokasi ditunjukkan masing-masing pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Sehingga dari hasil keduanya dipilih metode *clustering* yang dianggap memiliki hasil yang lebih baik dalam inisiasi hiposenter. Pola sebaran dan *cluster* yang dihasilkan ditunjukkan pada **Gambar 5** secara horizontal dan **Gambar 6** secara vertikal berarah *easting*.

## 4.2 Hasil *Hydroshearing*

Proses injeksi menggunakan sumur *NWG 55-29* meliputi dua tahap. Tahap pertama berlangsung sejak 27 Oktober sampai Februari 2013, kemudian tahap kedua dimulai sejak tahun 2014. Sumur injeksi *NWG 55-29* memiliki total kedalaman (*measured depth*) 3048 meter yang dilapisi *casing* sampai kedalaman 1970 meter (Peluchette dan Anderson, 2013). Tujuan dibuatnya *casing* agar injeksi dapat menuju area target, namun terjadi kebocoran *casing*, hal tersebut teridentifikasi dari adanya *event* yang berada disekitar dinding sumur (Aguiar dan Myers, 2017).

**Gambar 7** menampilkan sebaran *event* hasil injeksi tahap pertama dan kedua yang mengindikasikan adanya kebocoran *casing* sumur. Warna kuning pada sumur injeksi merupakan area *casing*, sedangkan

warna putih merupakan *open cased*. *Event* warna merah dihasilkan oleh injeksi tahap pertama dengan 146 *event* gempa mikro. Sebaran *event* disekitar dinding sumur yang ter-*casing* menandai adanya kebocoran (*casing leak*), sehingga proses injeksi dilanjutkan setelah dilakukan perbaikan pada *casing* sumur. Adapun warna biru ialah *event* gempa mikro produk injeksi tahap kedua dengan total 344 *event*.

### 4.3 Sebaran Vp/Vs dan Poisson's Ratio

Pemodelan rasio Vp/Vs didasarkan pada sebaran hiposenter yang telah dilakukan sebelumnya, namun tidak menyertakan keseluruhan *event*. Hal tersebut disebabkan beberapa *event* hasil pemrosesan memberikan nilai sebaran dengan penyimpangan yang begitu besar. Hasil perhitungan menunjukkan variasi Vp/Vs berkisar antara 1,35 sampai 2,99 dengan tampilan yang ditunjukkan pada **Gambar 8**. Dimana pengukuran sebelum EGS menghasilkan rasio Vp/Vs berada pada kisaran 1,77 Km/s.

Pada medium elastis, *stress* yang bekerja dipengaruhi oleh komponen arah vertikal dan horizontal atau yang dikenal dengan *Poisson ratio*. Faktor utama yang berpengaruh adalah tingkat kebasahan medium. Sehingga *Poisson ratio* digunakan untuk menentukan jenis fluida dan tingkat kejenuhannya. Secara horizontal peta sebaran *Poisson ratio* ditampilkan pada **Gambar 9**. Dari hasil perhitungan manual didapatkan *Poisson ratio* memiliki rentang nilai -0,09 sampai 0,43 dengan rata-rata 0,28.

Seperti halnya nilai Vp/Vs, keakuratan hasil perhitungan *Poisson ratio* didasarkan pada korelasi data plot menggunakan diagram Wadati. Rata-rata korelasi hasil digaram Wadati berkisar 0,94 dengan korelasi terendah 0,69. Penentuan jenis fluida didasarkan pada nilai *Poisson ratio* (**Tabel 1**), semakin tinggi nilai yang dihasilkan akan semakin jenuh air. Zona *porous* yang terisi air akan

memiliki nilai  $\geq 0,3$  sedangkan uap ataupun gas memiliki rentang nilai  $\leq 0,14$ . **Gambar 10** menunjukkan pola pergerakan fluida hasil injeksi menuju ke arah selatan, barat daya dan tenggara yang dipengaruhi oleh orientasi rekahan.

Zona *open cased* yang merupakan zona target berada pada kedalaman lebih dari 1970,6 meter, sehingga nilai *Poisson ratio* yang tinggi namun berada pada kedalaman di atas zona target merupakan sebaran air hasil kebocoran *casing*. Tampilan vertikal sebaran *Poisson ratio* berikut (**Gambar 11** dan **Gambar 12**) digunakan untuk memperkuat asumsi diatas sekaligus acuan penentuan zona produktif reservoir.

### 4.4 Volumetrik Artificial Reservoir

Dengan diketahuinya sebaran hiposenter *event* gempa mikro yang mengindikasikan adanya deformasi karena terbentuknya rekahan serta sebaran nilai *Poisson ratio* maka dapat diketahui keberadaan dan pola aliran fluida (terutama air) pengisi reservoir. Berdasarkan jenis fluida pengisi dan kedalaman target dapat diklasifikasikan menjadi tiga produk EGS.

1. Zona jenuh, berada pada area *casing* yang sebelumnya mengalami kebocoran saat injeksi tahap pertama. Area ini memiliki saturasi yang tinggi yang diindikasikan dengan nilai *Poisson ratio* yang relatif besar, namun temperaturnya hanya berkisar 200 – 300°F (93,3 – 148,8 °C). Zona ini sebagian besar berada pada elevasi 1500 – 0 meter atau kurang dari 1970 meter dari permukaan. Namun zona ini juga berada pada area *open cased* yang merupakan target injeksi. Total volume zona ini mencapai 5,51 km<sup>3</sup>.
2. Zona dominasi Uap, tersebar secara acak pada tiap lapisan, umumnya berada di sebelah utara sumur injeksi. diestimasi berdasarkan nilai *poisson ratio* yang rendah ( $\leq 0,14$ ). Area ini bukanlah zona target produksi. Zona ini memiliki total volume yang paling sedikit, yaitu 1,05 km<sup>3</sup>.

3. Zona dominasi air (**Gambar 13**), berupa reservoir buatan yang telah mengalami peningkatan permeabilitas dan terisi oleh air injeksi. Pada area ini dapat dilakukan pengeboran sumur produksi untuk pembangkit listrik. Sebagian besar berada pada kedalaman lebih dari 1970 meter dari permukaan dengan temperatur mencapai 500 - 600 °F atau 260 – 315,5 °C (Anonim, 2016). Penentuan volumetrik zona dominasi air didasarkan pada nilai *Poisson's ratio*  $\geq 3,0$  yang mengindikasikan *wet medium*. Total volume zona ini mencapai 22,01 km<sup>3</sup>, namun jumlah ini masih memperhitungkan volume diluar area target *artificial reservoir* dan tanpa menghitung zona jenuh yang juga berada pada area target.

Penentuan batas-batas volumetrik reservoir buatan didasarkan pada pola sebaran serta *event* terjauh yang dihasilkan dengan melihat nilai *Poisson's ratio* pada area tersebut. *Event* terjauh dari sumber injeksi juga mencirikan batas akhir rekahan yang terbentuk. Batas area reservoir diinterpretasikan berada pada *Easting* (X): 636411 dan *Northing* (Y): 4841500, dengan elevasi (Z) maksimum -1500 m (**Gambar 14**), yang masing-masing berada pada area *open cased*.

Hasil akhir pemodelan volumetrik reservoir ditunjukkan pada **Gambar 15** yang mencakup model volumetrik zona jenuh (*isovolume* ungu), zona dominasi air (*isovolume* merah) dan daerah utama *artificial reservoir* (model balok) dimana masing-masing merupakan produk *hydroshearing* berupa injeksi air dengan estimasi volume sebesar 1,59 km<sup>3</sup>.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penentuan *event* gempa mikro dengan hasil lebih baik didapatkan dengan metode *Clustering*, dimana *RMS* dan *error* lokasi yang dihasilkan lebih kecil

dibanding metode *SED*. Hal tersebut dikarenakan pada metode *Clustering* menggunakan asumsi dua hiposenter yang berdekatan dianggap sebagai fungsi jarak, sehingga dapat meminimalisir kesalahan model kecepatan tanpa koreksi stasiun. Sebaran *event* gempa mikro diklasifikasi berdasarkan dua tahap *hydroshearing* yang menghasilkan dua *cluster* utama. Injeksi fase I menghasilkan 146 *event* yang sebagian besar berada pada kedalaman kurang dari 1970 meter, karena adanya kebocoran *casing* sumur. Sedangkan injeksi fase II menghasilkan 344 *event* yang berada pada area *open cased*.

2. *Poisson's ratio* setelah *hydroshearing* memiliki rentang nilai -0,09 sampai 0,43 dengan rata-rata 0,28 dimana produk *artificial reservoir* dianggap memiliki nilai  $\geq 0,3$ . Berdasarkan tomografi *Poisson's ratio* terdapat tiga produk utama hasil *EGS*, yaitu zona jenuh, zona dominasi uap dan zona dominasi air. Masing-masing memiliki total volume 5,51 km<sup>3</sup>, 1,05 km<sup>3</sup> dan 22,01 km<sup>3</sup>.
3. *Artificial reservoir* mencakup ketiga zona yang berada pada area *open cased* berarah tenggara (SE), selatan (S) dan barat daya (SW) dari sumur injeksi dengan estimasi volume 1,59 km<sup>3</sup>.

### 5.2 Saran

Beberapa saran terkait pengembangan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Akurasi pembacaan *arrival time* akan sangat dipengaruhi oleh kualitas *picking* fasa gelombang, sehingga diperlukan komprasi beberapa hasil *picking* sebagai pembanding.
2. Identifikasi orientasi rekahan yang terbentuk akan lebih baik dengan menampilkan *focal mechanism* berdasarkan momen tensor maupun analisis *particle motion* pada masing-masing *event*.
3. Dapat dilakukan perhitungan *Poisson's ratio* dengan *input* rasio atenuasi

gelombang (Qp/Qs) sebagai pembanding.

*Earthquakes Associated With The Newberry EGS Injection September –December 2014. Final Report.*

### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Departement of Energy United States (DOE U.S) 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.

Frone, Z., Waibel, A., dan Blackwell, D. 2014. *Thermal Modeling and EGS Potential of Newberry Volcano, Central Oregon*. California: Proceedings 39<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.

Havskov dan Ottemoller. 2010. *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Bergen: Springer Publishers.

### DAFTAR PUSTAKA

Aguiar, A., dan Myers, S. 2017. *Microseismic Event Relocation based on Pagerank Linkage at the Newberry Volcano Geothermal Site*. California: Thirty-Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.

Hochstein, M. P., dan Browne, P.R.L. 2000. *Surface Manifestation of Geothermal System With Volcanic Source*. In Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press.

Cladouhos, T., Petty, S., Noerdin, Y., dan Moore, M. 2013. *Stimulation Results From The Newberry Volcano EGS Demonstration*. Seattle: GRC Transactions, Vol. 37. Hal 133.

Hurukawa, N. 2008. *Practical Analysis of Local Earthquakes*. Tsukuba: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISEE). Hal 1-5.

Cladouhos, T., Petty, S., Swyer, M., dan Uddenberg, M. 2015. *Results From Newberry Volcano EGS Demonstration 2010 - 2014*. Seattle: Elsevier Ltd.

Kirkland, K. 2010. *Earth Sciences: Notable Research and Discoveries*. Infobase Publishing.

Departement of Energy United States (DOE). 2012. *What is an Enhanced Geothermal System (EGS)*. Essai DOE/EE-0785.

Kisslinger, C., dan Engdahl, E. R. 1973. *The Interpretation of The Wadati Diagram With Relaxed Assumptions*. Seismological Society of America.

Establishment of the Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE). 2016. *Appendix A Conceptual Geologic Model*. Oregon.

Kristiansen, T. G. 2000. *Use Passive Seismic Monitoring in Well and Casing Design in the Compacting and Subsiding Valhall Field, North Sea*. Paris: SPE Conference. Paper.

Foulger, G. R., dan Julian, B. R. 2015. *Processing of Induced*

Letvin, A. I. 2011. *Analysis of Drill Cuttings Mineralogy and Geophysical Logs to Investigate Alteration History at Newberry NWG 55-29 in Preparation for*

- EGS Stimulation*. Iceland: Confidential M. S Thesis.
- MacLeod, N., Sherrod, D., Chitwood, L., dan Jensen, R.A. 1995. *Geologic Map of Newberry Volcano, Deschutes, Klamath and Lake Counties*. Oregon: U.S Geological Survey.
- Majer, E. L., dan Mc Evilly, T. V. 1979. *Seismological Investigations at The Geysers geothermal Field*. California: Geophysics.
- Maulida, N. H. 2015. *Memantau Aktivitas Sistem Panas Bumi Dengan Metode Mikroseismik*. Essai.
- Maxwell, S. 1998. *Microseismic Logging of Ekofisk Reservoir*. Totndheim: Eurock Presentation Rock Mechanism Petroleum Engineering Conference.
- Mujihardi, B., Widarto, D., Nugraha, A. D., dan Widiyantoro, S. 2012. *Careful Picking of P-Wave & S-Wave Arrival Times of Microseismic for Accurate Hypocenter Determination*. Paper.
- Nugraha, A. D. 2012. *Earthquake*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Peluchette, J dan Anderson, B. 2013. *Optimization of Integratde Reservoir, Wellbore and Power Plant Models for Enhanced Geothermal Systems*. California: Thirty-Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.
- Rutledge, J., dan Philips, W. 2003. *Hydraulic Stimulation of Natural Fractures as Revealed by Induceed Micriearthquakes, Carthage Cotton Valley Gas Field, East Texas*. Geophysics.
- Sahara, D. P., Kusumo, A. W., Widiyantoro, S., dan Sule, R. 2009. *Aplikasi Metode Double Difference Untuk Relokasi Hiposenter Gempa Vulkanik Gunung Kelud Secara Akurat*. Jurnal JTM. Vol 17. No 1.
- Sanyal dan Subir, K. 2005. *Geothermal Resource Characteristics, Development, Assessment and Management*. Proceedings WGC 2005.
- Sherrod, D., Mastin, L., Scott, W., dan Schilling, S. 1997. *Volcano Hazards at Newberry Volcano, Oregon*. Hawaii: U.S Geological Survey.
- Somerton, W. 1978. *Some Physical Properties of Cerro Prieto Cores Geothermal Fields*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Suharno. 2013. *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Penerbit Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Waldhauser, F., dan Ellsworth, W. L. 2000. *A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to Nothern Hayward Fault*. California: Bulletin of the Seismological Society of America.

**Tabel 1.** Harga *Poisson's ratio* pada beberapa penelitian

Peneliti	Kering	Tersaturasi Uap	Tersaturasi Air	Lokasi
Somerton, 1978	0,1		0,3	Lapangan Panas Bumi Cerro Prieto
Majer dan Evily, 1979		0,15 – 0,2		Lapangan Panas Bumi Geysir
Silitonga dan Suroso, 2005		< 0,25	> 0,25	Lapangan Panas Bumi Lahendong

**Tabel 2.** Model kecepatan 1D daerah penelitian (Foulger dan Julian, 2015)

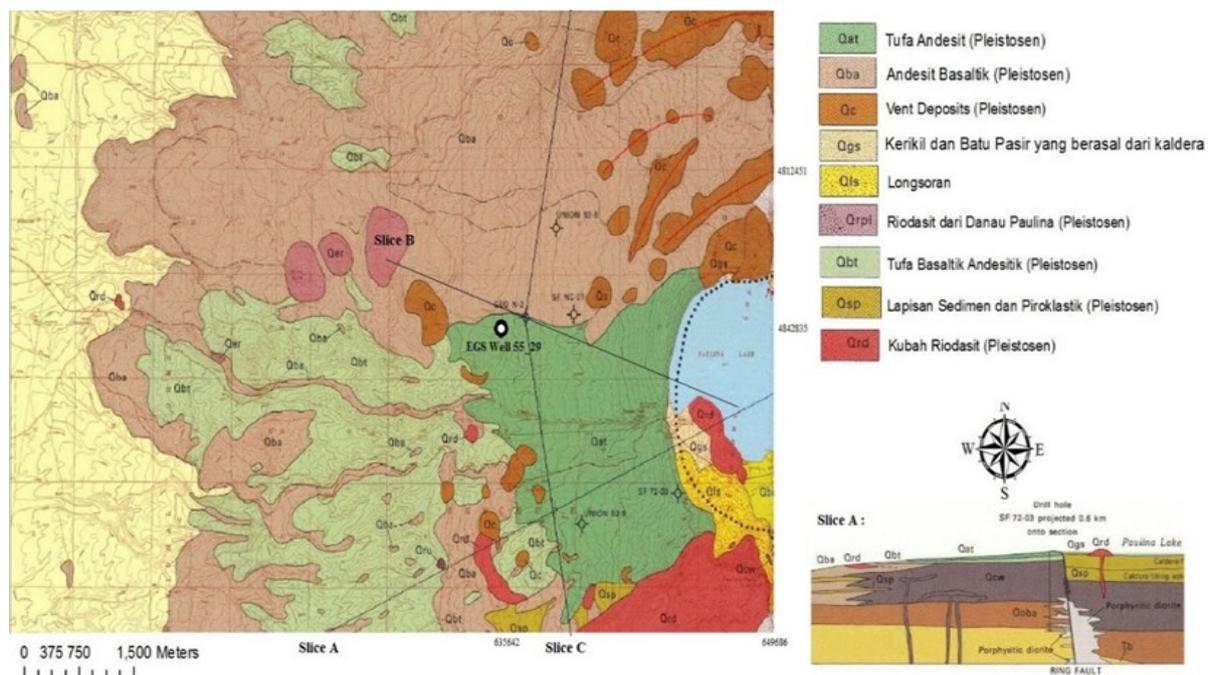
Ketebalan (km)	Elevasi (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
0,300	1400	2,034	1,236
0,150	1250	3,330	2,015
0,150	1100	3,507	2,122
0,150	950	3,673	2,222
0,25	700	3,767	2,279
0,90	-200	3,800	2,299
200	-20	4,700	2,843

**Tabel 3.** Perbandingan *origin time* metode *SED* dan *Clustering*

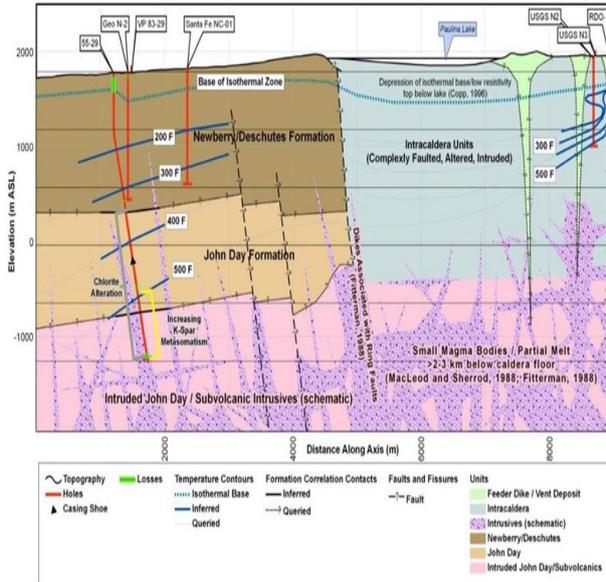
<i>Arrival Time</i>	Metode <i>SED</i>		Metode <i>Clustering</i>	
	<i>Origin time</i> (s)	<i>RMS error</i>	<i>Origin time</i> (s)	<i>RMS error</i>
29-10-2012 08:02	21.437	0.184	21.413	0.1
31-10-2012 02:13	5.556	0.154	5.44	0.07
01-11-2012 11:07	8.689	0.076	8.782	0.1

**Tabel 4.** Perbandingan *error* hiposenter pada metode *SED* dan *Clustering*

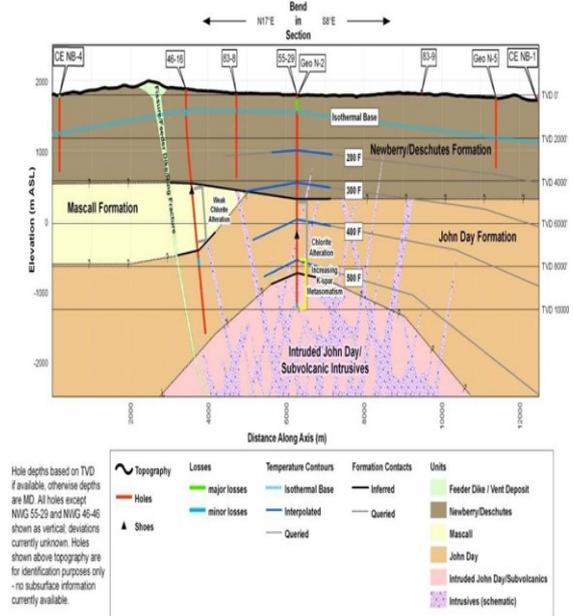
Metode <i>SED</i>				Metode <i>Clustering</i>			
<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Elevasi	<i>error</i>	<i>Easting</i>	<i>Northing</i>	Elevasi	<i>error</i>
636480	4842081	-561	6.699	636048	4842938	-434	0.22
636290	4843604	-600	5.606	635924	4842925	-607	0.07
636030	4843358	686	4.332	635708	4843059	1500	0.1



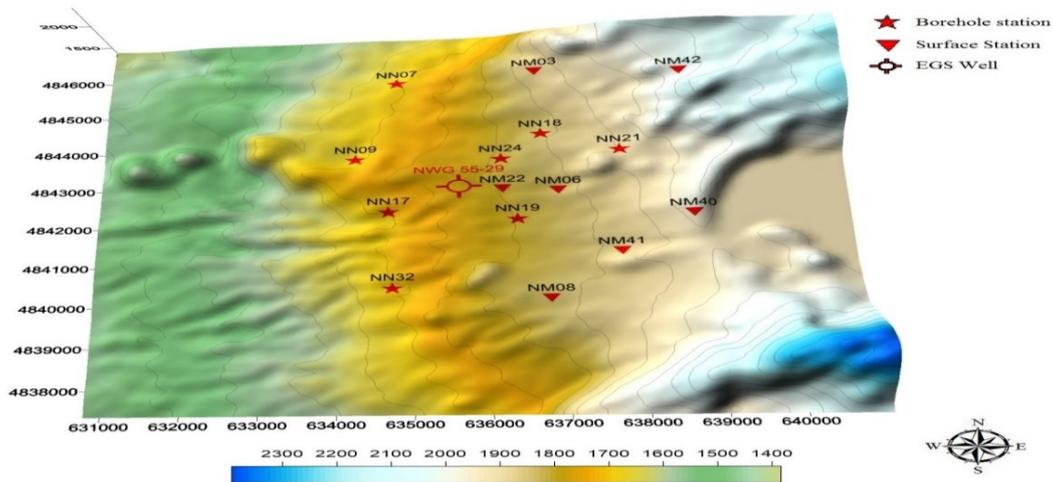
**Gambar 1,** Peta geologi regional Newberry beserta tampilan *slice A* (dimodifikasi dari MacLeod dkk., 1995)



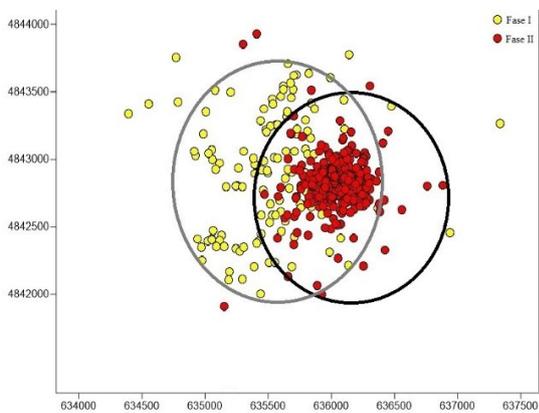
Gambar 2. Konseptual model geologi dan temperatur slice B (FORGE, 2016)



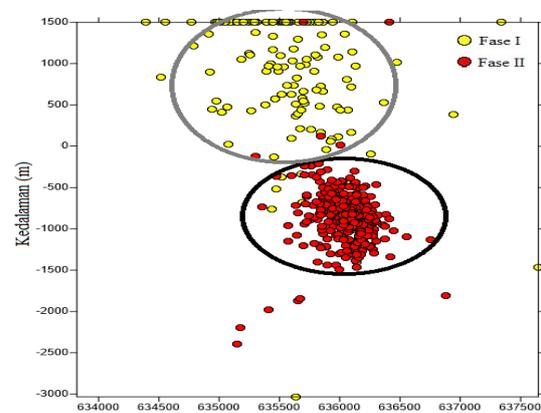
Gambar 3. Konseptual model geologi dan temperatur slice C (FORGE, 2016)



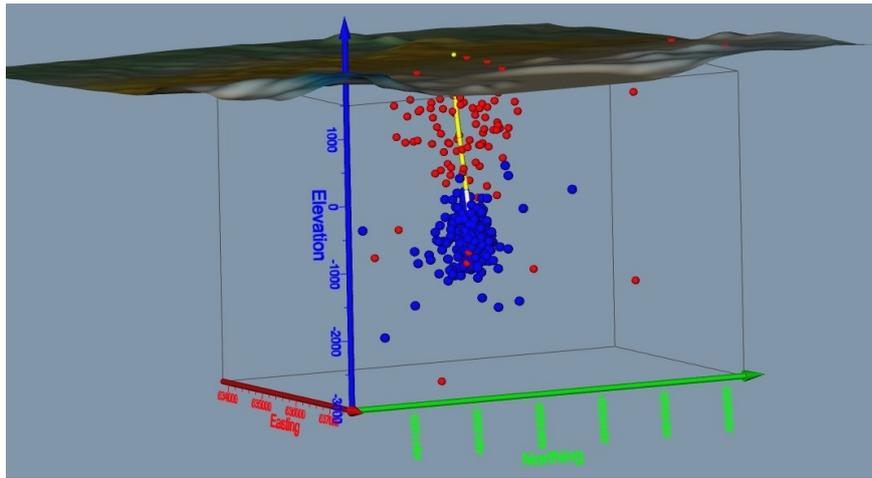
Gambar 4. Topografi daerah penelitian dan lokasi stasiun



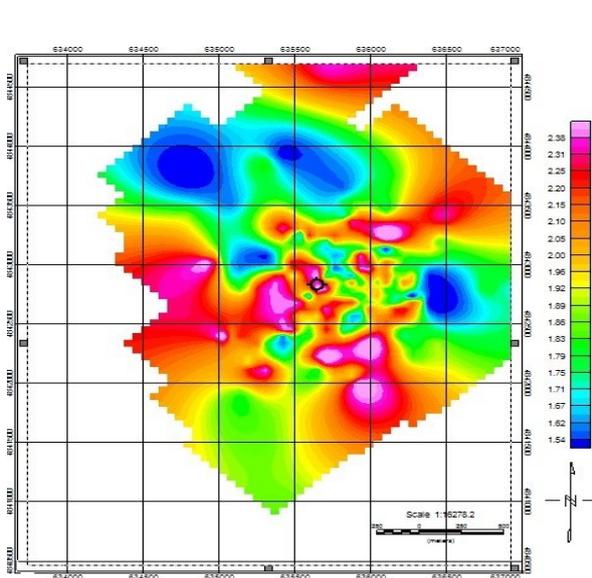
Gambar 5. Sebaran hiposenter berdasarkan cluster secara horizontal



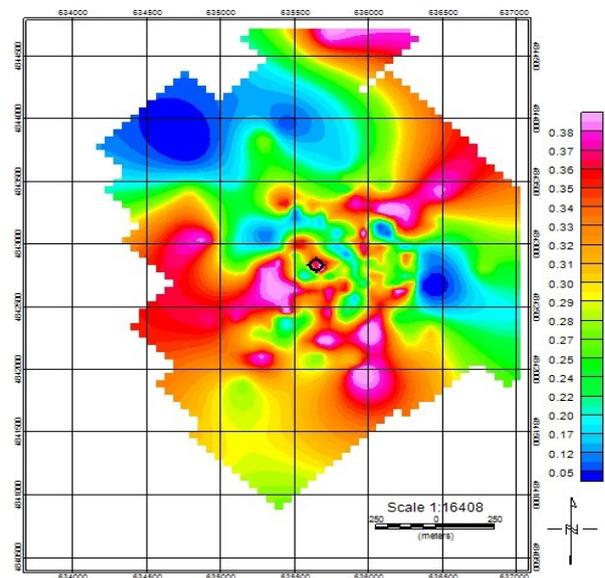
Gambar 6. Sebaran hiposenter berdasarkan cluster secara vertikal



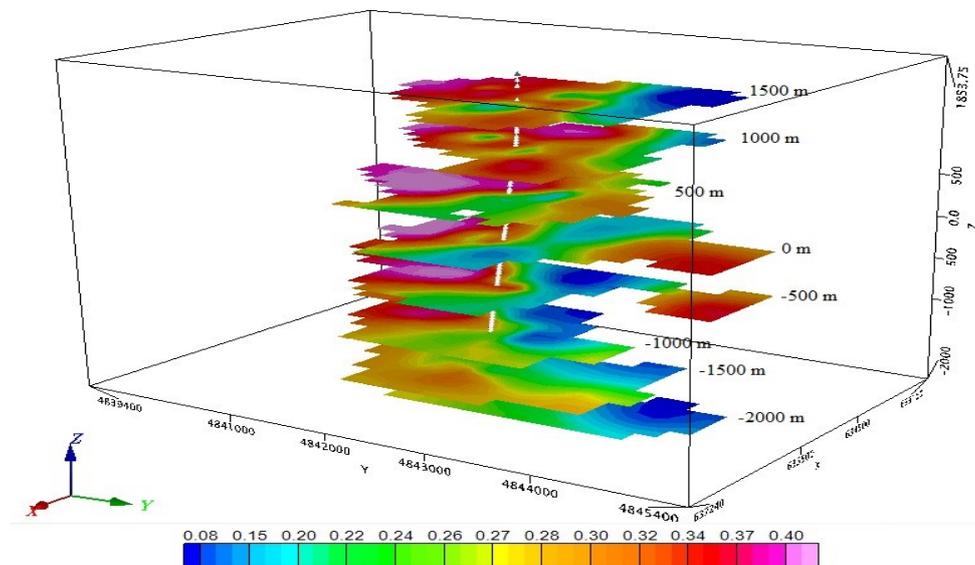
**Gambar 7.** Sebaran *event* gempa mikro beserta sumur injeksi, dengan garis kuning merupakan area casing.



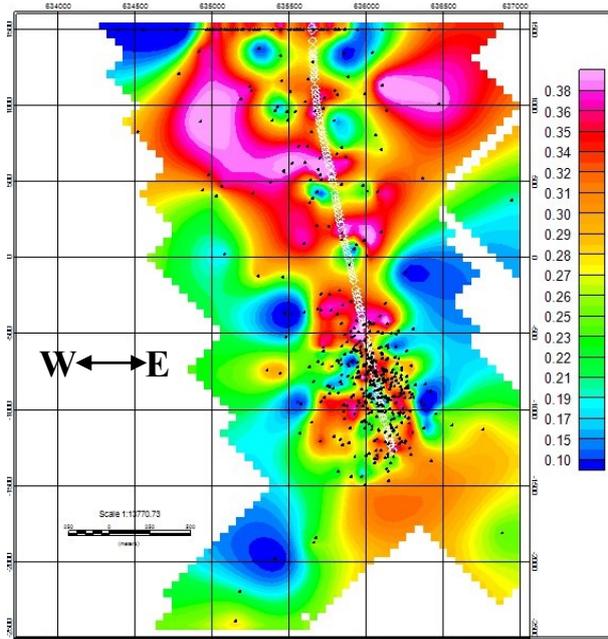
**Gambar 8.** Tampilan horizontal  $V_p/V_s$



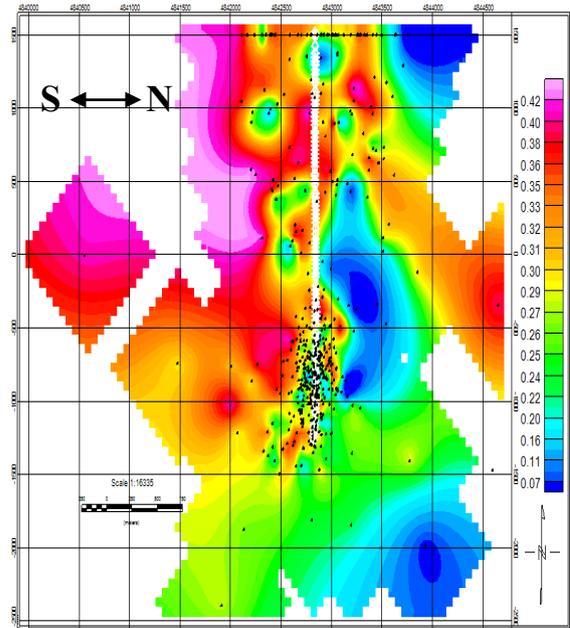
**Gambar 9.** Tampilan horizontal *Poisson's Ratio*



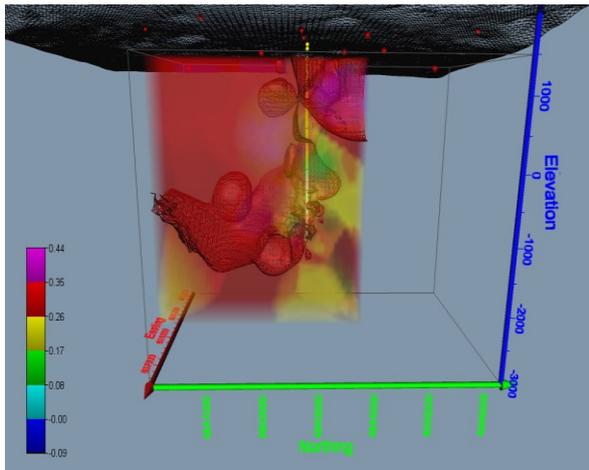
**Gambar 10.** *Cross section Poisson ratio* pada beberapa kedalaman



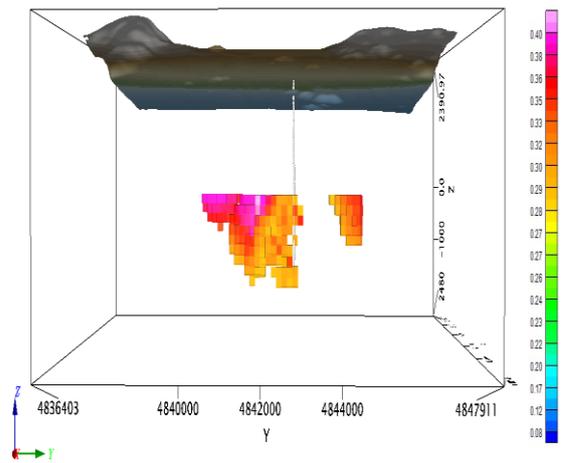
**Gambar 11.** Sebaran vertikal *Poisson's ratio* arah barat - timur



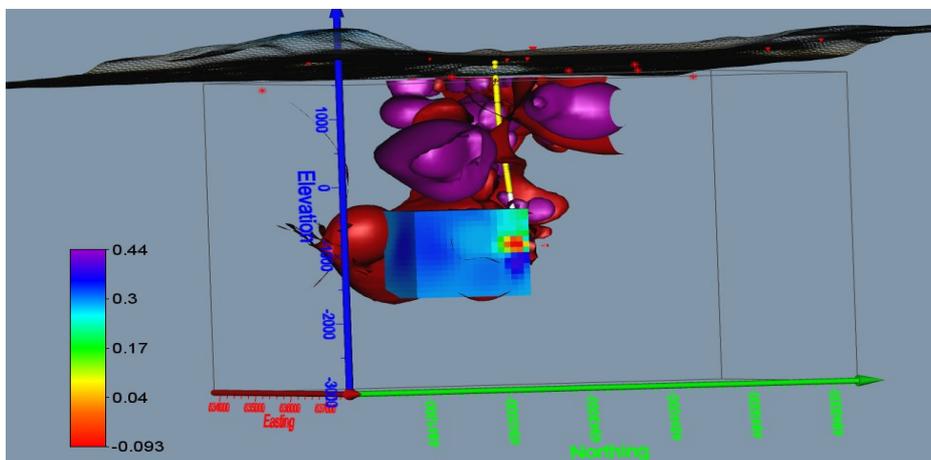
**Gambar 12.** Sebaran vertikal *Poisson's ratio* arah selatan - utara



**Gambar 13.** Volumetrik zona dominasi air



**Gambar 14.** *Slice* vertikal pada arah timur (*easting*)



**Gambar 15.** Hasil akhir EGS