

Estimasi *Poisson's Ratio* untuk Analisis Derajat Saturasi Air pada Reservoir Geotermal Menggunakan Data *MEQ*

Mariyanto, Bagus Jaya Santosa, dan Ayi Syaeful Bahri
Jurusan Fisika, Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: mariyanto09@mhs.physics.its.ac.id

Abstrak—Lapangan “Mar” merupakan lapangan di Indonesia yang memproduksi sumber energi geotermal. Untuk memantau kondisi reservoir geotermal dapat dilakukan dengan analisis gelombang *microearthquake* (MEQ). Data MEQ diolah dengan cara melakukan *picking* terhadap waktu tiba gelombang P (t_p) dan waktu tiba gelombang S (t_s) untuk menentukan hiposenter event MEQ. Selanjutnya dilakukan analisis dengan diagram Wadati untuk menentukan nilai v_p/v_s di setiap lokasi event MEQ sehingga dapat diestimasi distribusi nilai *Poisson's ratio* pada batuan di reservoir geotermal. *Poisson's ratio* merupakan sifat elastisitas batuan yang mengindikasikan tingkat rekahan yang mana bernilai lebih tinggi pada batuan yang tersaturasi air daripada batuan pada kondisi normal. Distribusi persebaran nilai *Poisson's ratio* digunakan untuk menganalisis derajat saturasi air dengan mengorelasikannya terhadap data resistivitas. Hasil penelitian menunjukkan telah diperoleh 135 lokasi hiposenter MEQ dengan distribusi nilai *Poisson's ratio* bervariasi dari 0,101 sampai 0,448. Zona dengan nilai derajat saturasi air yang tinggi diindikasikan oleh zona dengan sebaran distribusi nilai *Poisson's ratio* yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah.

Kata Kunci—geotermal, *microearthquake* (MEQ), *Poisson's ratio*, saturasi air

I. PENDAHULUAN

Geotermal atau panas bumi merupakan sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetis semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem. Elemen-elemen penting penyusun sistem geotermal terdiri dari tiga yaitu: adanya sumber panas, adanya batuan reservoir yang permeabel dan adanya fluida yang membawa aliran panas [1]. Sumber panas berasal dari panas yang dihasilkan dari instruksi batuan beku. Batuan reservoir merupakan batuan tempat fluida terakumulasi. Sistem geotermal di Indonesia umumnya merupakan sistem hidrothermal yang mempunyai temperatur tinggi (>2250C), hanya beberapa diantaranya yang mempunyai temperatur sedang (150-2250C) [2].

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi geotermal terbesar di dunia dengan cadangan sekitar 40% dari cadangan dunia. Jumlah itu setara dengan energi sebesar 29 GW. Sesuai dengan Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) bahwasanya pemanfaatan panas bumi ditargetkan menjadi energi primer yang optimal dengan pemanfaatan lebih dari 5 % pada tahun 2025 [3]. Aktivitas eksplorasi dan eksploitasi sangat

diperlukan agar sumber energi geotermal dapat dimanfaatkan dengan optimal.

Aktivitas kegempaan merupakan salah satu fenomena yang terjadi pada area produksi lapangan geotermal “Mar”. Gempa kecil atau *microearthquake* terjadi dengan magnitudo kurang dari 3 Mw [4]. Injeksi fluida pada saat proses produksi akan menghasilkan tekanan yang melawan formasi batuan dan menciptakan rekahan hidrolik (*hydraulic fracture*). Rekahan yang terbentuk akan menyebabkan timbulnya *microearthquake* yang melepaskan energi gelombang seismik [5]. Oleh karena adanya aktivitas kegempaan ini, untuk melakukan monitoring pada zona reservoir geotermal Wayang Windu dapat digunakan data *microearthquake* (MEQ) yang merupakan data dari hasil pengukuran dengan metode seismik pasif. [6].

Data MEQ dapat digunakan untuk mengestimasi nilai *Poisson's ratio* [7]. Penentuan *Poisson's ratio* dapat dilakukan dengan analisis diagram wadati dengan memasukkan waktu tiba gelombang P dan S yang mana nilai ini diestimasi dari kecepatan gelombang primer (v_p) dan kecepatan gelombang sekunder (v_s) yang terukur dari data seismik atau data sonik [8,9]. *Poisson's ratio* merupakan sifat elastisitas batuan yang mengindikasikan tingkat rekahan (*fracturing*) pada batuan tersebut yang mana nilai *Poisson's ratio* akan lebih tinggi dari kondisi normal pada batuan yang terisi cairan [9]. Eksperimen laboratorium menunjukkan pengukuran *Poisson's ratio* pada batuan kering dan tersaturasi air memiliki nilai masing-masing 0,1 dan 0,3 [10]. Lapangan Geotermal East Mesa, California memiliki batuan dengan nilai *Poisson's ratio* yang lebih tinggi sebesar 0,4. Estimasi *Poisson's ratio* dari data yang diperoleh dengan metode seismik pasif berguna untuk mengindikasikan derajat saturasi air pada reservoir geotermal [7].

II. METODE

A. Kajian Literatur

Kajian literatur diambil dari beberapa sumber baik dari buku, internet, artikel, jurnal penelitian terdahulu maupun data-data lain yang terkait penelitian. Tujuannya adalah mempermudah pemahaman tentang penelitian yang akan dilakukan.

B. Pengumpulan Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: data *microearthquake* (MEQ) yang merupakan data primer dengan format *.sac* dan data pendukung berupa distribusi sebaran resistivitas daerah penelitian.

C. Penentuan Hiposenter

Pengolahan data MEQ diawali dengan menentukan letak hiposenternya. Data MEQ dengan format *.sac* akan dapat dibaca dengan menggunakan *software Winquake* yang merupakan *software* untuk mengetahui bentuk gelombang MEQ yang terukur. Dengan menggunakan *software Winquake* dapat dilakukan penentuan waktu tiba gelombang P dan gelombang S. Data yang didapatkan adalah waktu datang gelombang P, waktu datang gelombang S dan posisi dari stasiun berupa nilai *latitude* dan *longitude*-nya.

Selanjutnya data-data yang diperoleh dari pengolahan dengan *software Winquake* digunakan sebagai data masukan untuk penentuan hiposenter gempa menggunakan *software Hypo71*. Pengolahan dengan *software Hypo71* dilakukan dengan memasukkan tiga jenis data, yaitu data stasiun yang meliputi nama stasiun dan letak stasiun seismometer, data model bumi berupa kecepatan gelombang P (v_p) pada tiap kedalaman lapisan bumi dan fase gelombang P dan S yang meliputi nilai waktu datang gelombang datang P dan S dan jenisnya.

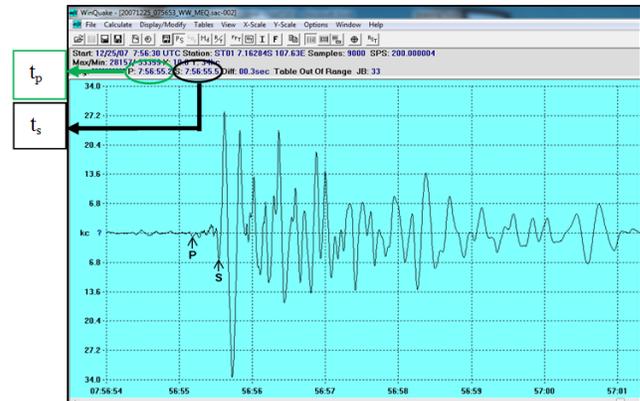
D. Distribusi Poisson's ratio

Estimasi nilai *Poisson's ratio* didapatkan melalui analisis diagram Wadati menggunakan *Microsoft Excel* dengan data masukan berupa waktu tiba gelombang P (t_p) untuk plot data pada sumbu-x dan selisih waktu tiba gelombang S (t_s) dengan waktu gelombang P (t_p) atau $t_s - t_p$ untuk plot data sumbu-y dari setiap stasiun seismometer yang mengukur terjadinya satu *event* MEQ. Dari diagram Wadati, akan didapatkan nilai v_p/v_s yang merupakan nilai perbandingan kecepatan gelombang P (v_p) dengan kecepatan gelombang S (v_s). Dengan nilai v_p/v_s dapat ditentukan nilai *Poisson's ratio* dengan melakukan perhitungan. Hal yang sama juga dilakukan untuk *event-event* MEQ lainnya sehingga akan didapatkan nilai *Poisson's ratio* untuk setiap satu *event* MEQ. Selanjutnya dilakukan pemetaan distribusi persebaran nilai *Poisson's ratio* menggunakan *software Oasis Montaj*. Data masukan pada pengolahan menggunakan *software Oasis Montaj* berupa data lokasi hiposenter MEQ sebagai data titik x, y, z dan data nilai *Poisson's ratio* sebagai data parameter fisis. Dari pengolahan ini akan didapatkan gambaran tiga dimensi distribusi persebaran *Poisson's ratio*. Untuk memudahkan analisis maka dibuatlah *cross section* (penampang) dua dimensi.

E. Korelasi Data

Korelasi data dilakukan dengan membandingkan dan mencocokkan antara data hasil pengolahan dari data primer dengan data pendukung yang diperoleh secara langsung tanpa melalui proses pengolahan data. Pada penelitian tugas akhir ini, data hasil pengolahan dari data primer berupa distribusi

persebaran *Poisson's ratio* sedangkan data distribusi persebaran resistivitas sebagai data pembandingnya.



Gambar 1. Proses *picking* gelombang P dan S dengan *Winquake*

F. Analisis Derajat Saturasi Air

Analisis derajat saturasi air dilakukan secara kualitatif. Derajat saturasi air dianalisis berdasarkan distribusi persebaran nilai estimasi *Poisson's ratio*. Tujuan dari proses ini adalah menentukan zona yang memiliki derajat saturasi air yang relatif tinggi yang merupakan zona prospektif.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Picking Gelombang P dan Gelombang S

Data MEQ diperoleh dari 12 stasiun seismometer yang terpasang di lapangan geotermal "Mar". Setiap stasiun pengukuran memiliki lokasi yang berbeda-beda dan menyebar di sepanjang area geotermal. Data MEQ dengan format *.sac* yang diolah dengan *software Winquake* menampilkan rekaman pergerakan tanah dalam dimensi tegangan listrik. Dengan menggunakan *software Winquake*, dapat dilihat bentuk dari gelombang MEQ dan dilakukan *picking* terhadap gelombang P dan gelombang S dari gelombang gempa yang ada. *Picking* merupakan proses penentuan waktu tiba gelombang P (t_p) dan waktu tiba gelombang S (t_s) yang akan digunakan pada pengolahan data tahap berikutnya.

Contoh proses *picking* gelombang P dan gelombang S salah satu gelombang MEQ yang terjadi di Lapangan Geotermal Wayang Windu dengan menggunakan *software Winquake* yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil *picking* memperlihatkan t_p adalah 7:56:55:2 yang ditunjukkan oleh lingkaran warna hijau sementara t_s adalah 7:56:55:5 yang ditunjukkan oleh lingkaran warna hitam. Perbedaan waktu hasil *picking* ($t_s - t_p$) sebesar 0,3 detik. Setiap hasil *picking* menunjukkan bahwa nilai t_p selalu lebih kecil daripada t_s dikarenakan kecepatan gelombang P (v_p) lebih besar dibandingkan kecepatan gelombang S (v_s).

B. Penentuan Hiposenter MEQ

Untuk penentuan hiposenter menggunakan *software Hypo71* diperoleh 135 *event* MEQ yang terjadi di lapangan geotermal "Mar" yang ditunjukkan pada Gambar 2. Prinsip yang digunakan adalah pemodelan inversi yaitu menentukan

parameter model bumi dari pemrosesan data observasi lapangan. Data parameter model bumi berupa lokasi koordinat sumber MEQ yang terdiri dari posisi pada sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z. Sementara itu data observasi berupa waktu tiba gelombang P dan waktu tiba gelombang S.

Dari pengolahan data yang telah dilakukan, dapat diketahui letak hiposenter dan episenter. Hiposenter merupakan lokasi terjadi sumber MEQ yang terjadi di bawah permukaan bumi sementara itu episenter merupakan lokasi terjadinya sumber MEQ dilihat secara horisontal pada bidang xy.

C. Distribusi Poisson's ratio

Nilai v_p/v_s diperoleh melalui analisis dengan menggunakan diagram wadati. Prinsip kerja diagram wadati adalah plotting waktu tiba gelombang P (t_p) dan gelombang S (t_s) pada suatu kurva regresi linear. Gradien kurva merupakan perbandingan antara t_s-t_p dengan t_p . Selanjutnya nilai t_p dan t_s-t_p diplot pada diagram Wadati dengan menggunakan *Microsoft Excel* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. t_p sebagai sumbu-x dan t_s-t_p sebagai sumbu-y.

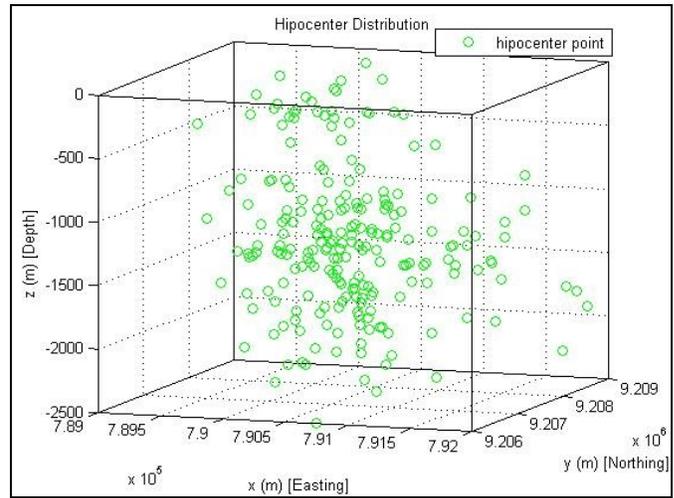
Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai gradien pada diagram adalah 0,743. Nilai gradien pada gambar 3 merupakan perbandingan antara nilai pada sumbu-x dengan nilai pada sumbu-y yaitu $(t_s-t_p)/t_p$. t_p dan t_s merupakan hasil dari jarak antara sumber gempa dengan lokasi stasiun pengukuran (D) dibagi dengan kecepatan gelombang P (v_p) dan kecepatan gelombang S (v_s). Secara matematis dapat dituliskan $t_p = D/v_p$ dan $t_s = D/v_s$. Dengan melakukan substitusi diperoleh nilai $v_p/v_s = 1 + \text{gradien}$. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan nilai v_p/v_s sebesar 1,743 untuk kasus pada Gambar 3. Nilai R^2 merupakan koefisien korelasi yang menunjukkan hubungan yang baik antara data t_p dan t_s-t_p yang dikorelasikan. Semakin mendekati nilai 1 nilai R^2 menunjukkan nilai yang baik. Nilai R^2 pada gambar 3 sebesar 0,995 yang mana menunjukkan nilai koefisien korelasi yang baik karena mendekati nilai 1.

Penentuan nilai estimasi *Poisson's ratio* didapatkan melalui kalkulasi dengan persamaan yang menghubungkan antara v_p/v_s dengan *Poisson's ratio*. Nilai *Poisson's ratio* menunjukkan nilai sifat elastisitas batuan pada tiap titik batuan tempat terjadinya event MEQ. Dari perhitungan yang dilakukan, didapatkan nilai *Poisson's ratio* yang bervariasi pada tiap lokasi event MEQ. Distribusi nilai *Poisson's ratio* pada tiap lokasi event MEQ dapat dilihat di Lampiran C. Nilai *Poisson's ratio* bervariasi dari minimal sebesar 0,101 sampai maksimal sebesar 0,448.

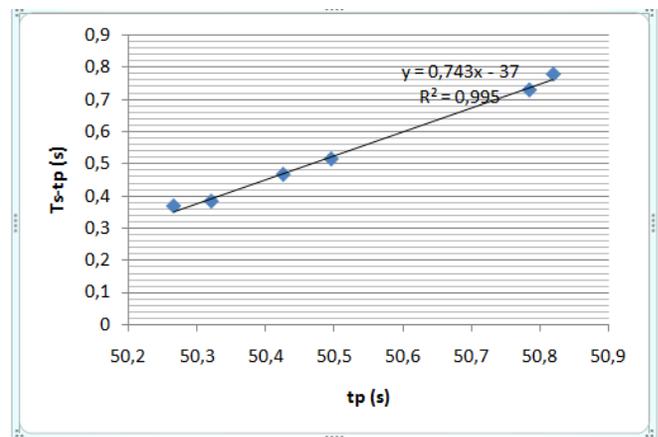
Distribusi persebaran nilai *Poisson's ratio* digambarkan secara tiga dimensi dengan *software Oasis Montaj* yang ditunjukkan pada gambar 4. Prinsip kerja *software* ini adalah interpolasi yang merupakan suatu cara untuk mencari nilai di antara beberapa titik data yang telah diketahui. Pengolahan dengan *software* ini dilakukan dengan memasukkan nilai posisi x,y dan z dan parameter fisis yang diinginkan. Dalam kasus ini parameter fisis yang dimaksud adalah *Poisson's ratio*. Distribusi persebaran nilai *Poisson's ratio* yang bervariasi ditunjukkan dengan adanya perbedaan warna.

Gambar 4 memperlihatkan zona-zona dengan warna yang

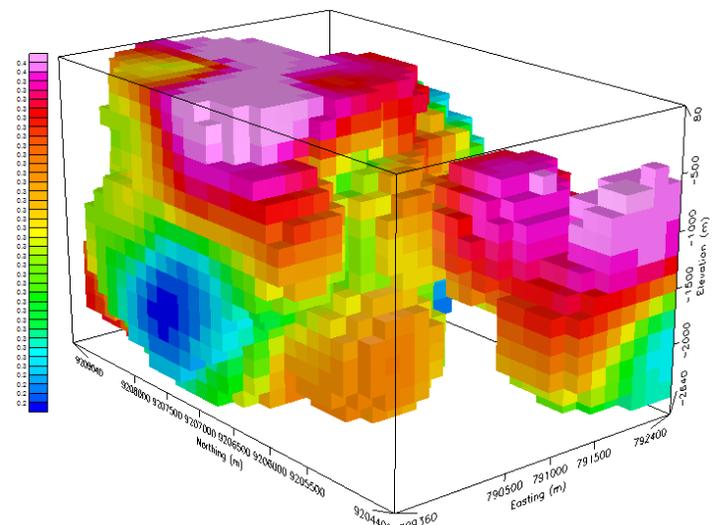
berbeda-beda. Hal ini menunjukkan perbedaan nilai *Poisson's ratio*. Batas perbedaan warna tidak dapat dilihat secara jelas karena tampilannya masih tiga dimensi. Selanjutnya untuk memudahkan analisis data dibuatlah *cross section*



Gambar 2. Distribusi lokasi hiposenter MEQ



Gambar 3. Contoh analisis diagram Wadati



Gambar 4. Distribusi Poisson's ratio

(penampang) berdasarkan dominasi banyaknya titik lokasi *event* MEQ yang tersebar pada suatu garis lurus (*line*)

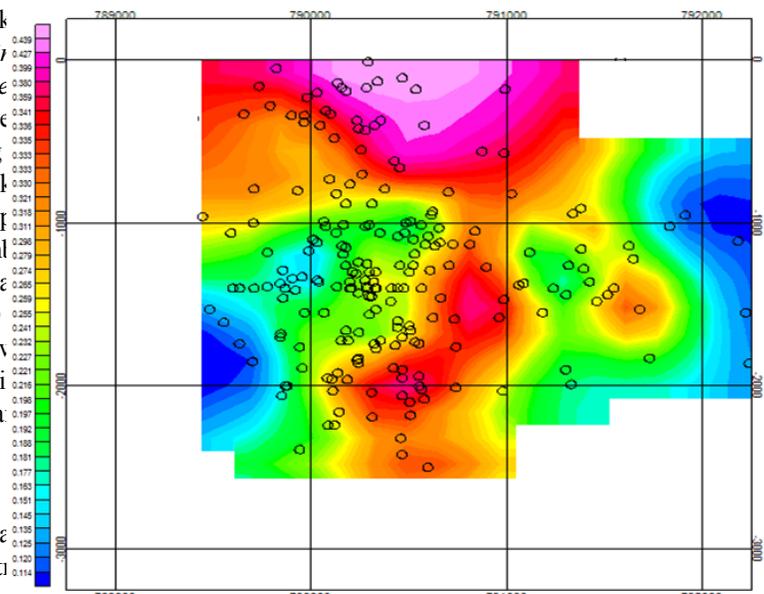
Line yang ditentukan untuk pembuatan *cross section* (penampang) ada dua yaitu Penampang 1 (Bidang XZ) dengan *line* $y = 9.207.500$ meter dan Penampang 2 (Bidang dengan *line* $x = 790.500$ meter. Selanjutnya hasil 1 penampang dapat dilihat pada Gambar 5 yang merupakan penampang arah *Easting* dengan kedalaman dan Gambar 6 merupakan penampang arah *Northing* dengan kedalaman. Titik-titik warna hitam merupakan proyeksi *event* MEQ terjadi terhadap bidang penampang. Perbedaan warna menunjukkan variasi nilai yang berbeda-beda dimulai warna biru sampai warna merah yang menunjukkan nilai rendah ke tinggi.

D. Korelasi Data

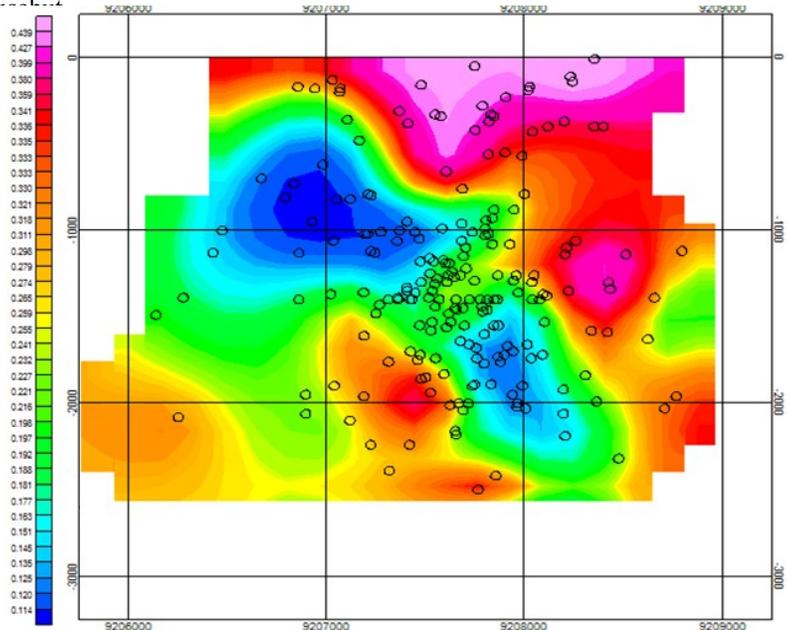
Korelasi data dilakukan dengan membandingkan antara distribusi persebaran *Poisson's ratio* dengan data distribusi persebaran resistivitas. Hasil korelasi data ditampilkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Gambar 7 merupakan korelasi data bidang ke timur (*Easting*) dengan kedalaman atau disebut korelasi data *cross section* 1. Sedangkan Gambar 8 merupakan korelasi data bidang ke utara (*Northing*) dengan kedalaman atau disebut korelasi data *cross section* 2. Di sebelah kiri merupakan distribusi persebaran nilai *Poisson's ratio* sedangkan di sebelah kanan merupakan distribusi persebaran nilai resistivitas. Nilai resistivitas ditunjukkan dengan perbedaan warna dari warna merah yang menunjukkan yang paling kecil hingga warna biru yang menunjukkan yang paling besar.

E. Analisis Derajat Saturasi Air

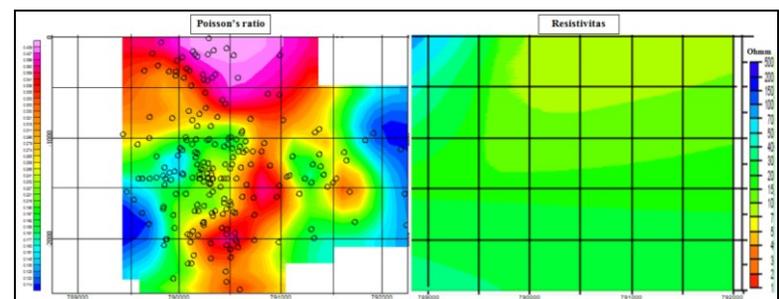
Nilai *Poisson's ratio* yang tinggi mengindikasikan derajat saturasi air yang tinggi karena adanya air pada akan cenderung memperbesar nilai *Poisson's ratio* gambar korelasi data di Gambar 7 dan Gambar 8 *Poisson's ratio* yang tinggi ditunjukkan dengan warna merah sampai ungu sedangkan warna biru menunjukkan nilai rendah. Selain itu, nilai resistivitas yang kecil mengindikasikan adanya air yang tersaturasi dalam. Pada dasarnya, daerah dengan nilai saturasi air yang tinggi secara kualitatif memiliki nilai *Poisson's ratio* yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah. Interpretasi Gambar 7 dan Gambar 8 memperlihatkan bahwa zona yang memiliki warna merah sampai ungu pada distribusi persebaran *Poisson's ratio* merupakan zona yang memiliki *Poisson's ratio* yang tinggi dan pada zona ini juga menunjukkan nilai resistivitas yang rendah sehingga zona ini diindikasikan memiliki derajat saturasi air yang tinggi pula. Warna merah diinterpretasikan sebagai zona dengan derajat saturasi air yang tinggi sedangkan warna ungu diinterpretasikan sebagai zona berubahnya fase air menjadi fase uap air.



Gambar 5. *Cross section* bidang XZ



Gambar 6. *Cross section* bidang YZ



Gambar 7. Korelasi data *cross section* 1

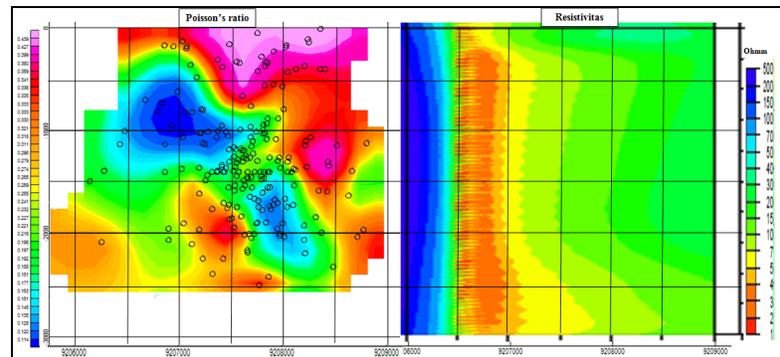
IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Didapatkan 135 hiposenter MEQ di lapangan geotermal “Mar”.
- b. Distribusi nilai *Poisson's ratio* bervariasi dari 0,101 sampai 0,448.
- c. Zona dengan derajat saturasi air yang tinggi diindikasikan pada zona dengan garis warna hitam yang memiliki nilai *Poisson's ratio* yang tinggi dan resistivitas yang rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Aji Syaeful Bahri dan Bapak Bagus Jaya Santosa atas bimbingan dan ilmu yang diberikan.



Gambar 8. Korelasi data *cross section 2*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Goff F. and Cathy J., "Encyclopedia of Volcanoes: Geothermal System", University of Rhode Island, USA, 2000.
- [2] Nenny, S., "Sekilas Tentang Panas Bumi", FTSM ITB, 2005.
- [3] Djumena, E., "Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Malu Pemanfaatan Panas Bumi Masih Minim", 2013.
<URL:<http://bisniskeuangan.kompas.com/read/2013/06/13/11561882/Menteri.ESDM.Malu.Pemanfaatan.Panas.Bumi.Masih.Minim>>.
- [4] Julian, B. R. and Foulger, G. R., "Monitoring Geothermal Processes with Microearthquake Mechanisms", Proceedings of Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-187, 2009.
- [5] Phillips, S. W., J. T. Rutledge, L. S. House, and M. C. Fehler, "Induced Microearthquake Patterns in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs: A Review", PAEGEOPH, LAUR 00-1328, 2001.
- [6] Gylfi Pall Herslr and Axel Bjornsson, "Geophysical Exploration For Geothermal Resources Principles and Application", UNU Geothermal Training Programme Reykjavik, Iceland, 2001.
- [7] Foulger G., "Geothermal Exploration and Reservoir Monitoring Using Earthquake and Passive Seismic Method" Geothermics, vol 11, No. 4, pp. 259-268, Pergamon Press Ltd, 1982.
- [8] Zhang J and Bentley L., "Factor Determining Poisson's ratio", CREWES Research Report, vol 17, 2005.
- [9] Manzella, A., "Geophysical Methods in Geothermal Exploration, Italian National Research Council International Institute for Geothermal Research Pisa, Italy, 1990.
- [10] Somerton W., "Some Physical Properties Of Cerro Prieto Cores". Proc. First Symp. Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico. Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098. 1978.