

Software Development of Spectrogram Analysis and Tomography Study of MEQ Data for Delineating Fracture Zone in Geothermal Area

Dzil Mulki Heditama^{1,2}, Yunus Daud^{1,3}, Wambra Aswo Nuqramadha^{1,4}, Rifqa Agung Wicaksono⁵ and Asrizal Masri⁵

¹Master Program in Geothermal Exploration, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

²Center for Geological Resources, Geological Agency, Indonesia

³Geothermal Laboratory, Department of Physics, The University of Indonesia

⁴PT NewQuest Geotechnology, Indonesia

⁵PT Star Energy, Indonesia

dzil.mulki@gmail.com

Keywords: microearthquake, spectrogram, hypocenter, relocation, moment tensor, tomography, fracture zone.

ABSTRACT

Determination of the reservoir fracture zone in Geothermal areas are very important for the purpose of determining the drilling point. Determination of the fracture zone can be performed by applying geophysical methods, one of which is microearthquake (MEQ) method. MEQ method can provide information relating with the structure of reservoir permeability, patterns of fluid injection movement, and field boundary of geothermal reservoir. There are several important methods to analyse fracture zone derived from MEQ data, i.e. relocation by using the double difference method, moment tensor and tomography. In this case the author conducted research related with the development of software that can be used to process and analyse the MEQ data. It is related with arrival time by using the spectrogram. After obtaining the location of hypocenter, the next step is to analyse the moment tensor and tomography. From the various analyzes performed, the determination of the fracture zone in geothermal area had been well done. It is expected that this study provides the best result, and thus can be applied in the determination of a more precise fracture zone.

PENDAHULUAN

Penentuan zona rekahan reservoir di daerah Geotermal sangat penting untuk keperluan penentuan titik pemboran. Penentuan zona rekahan tersebut dapat dilakukan dengan menerapkan metode geofisika, salah satunya adalah metode *microearthquake* (MEQ). Metode MEQ dapat memberikan informasi yang berkaitan dengan struktur permeabilitas reservoir, pola pergerakan fluida injeksi, dan batas reservoir pada lapangan geotermal.

Metode MEQ ini telah banyak diaplikasikan di berbagai wilayah geotermal baik di Indonesia, maupun di negara lain. Contoh aplikasi MEQ di Indonesia, seperti di Darajat, menggunakan tensor momen untuk analisis *fault*. Adapun di negara-negara lain, seperti Uganda dan Kenya, dilakukan analisis berbagai parameter yang terdapat dalam metode MEQ, seperti hiposenter dan anomali kecepatan P dan S. Dari penjelasan tersebut dapat diketahui bahwa metode MEQ sangat penting untuk diaplikasikan di daerah geotermal. Namun saat ini, *software* yang digunakan untuk melakukan pengolahan data MEQ masih terbatas. Oleh karena itu, penulis berupaya untuk melakukan penelitian terkait pengembangan *software* yang dapat digunakan untuk memproses dan menganalisis data MEQ tersebut (Heditama,

2014). Dalam hal ini *software* yang dikembangkan berkaitan dengan proses penentuan waktu tiba gelombang P dan S, dan durasi dengan menggunakan spektrogram. Selain itu, penulis juga melakukan studi tomografi data MEQ ditambah dengan analisis tensor momen data MEQ yang ditunjang dengan data-data pendukung lainnya seperti data geologi, geokimia, dan MT.

TEORI DASAR

Lokasi sumber *microearthquake* dapat ditentukan setelah waktu tiba gelombang P dan S yang terekam di permukaan diketahui. Lokasi hiposenter yang akurat ditentukan dengan penentuan waktu tiba gelombang P dan S yang dilakukan secara teliti. Perekaman data *microearthquake* dilakukan dengan menggunakan instrumen 3 komponen yang akan memberikan hasil data dalam arah vertikal (Z), arah Utara-Selatan (N-S) dan arah Barat-Timur (EW). Waktu tiba gelombang P dapat ditentukan dengan baik dengan mengamati data pada komponen vertikal (Z), sedangkan waktu tiba gelombang S dapat diperkirakan dengan mengamati data pada komponen horisontal (N-S dan W-E). Ada 2 teknik dalam proses penentuan waktu tiba, yaitu dapat dilakukan dalam bentuk sinyal gelombang, maupun dalam bentuk spektrogram.

Spektrogram merupakan hasil perhitungan spektrum frekuensi *windowed frames* dari sinyal majemuk. Perhitungan dilakukan dengan melakukan dengan menggunakan metode *Short-Time Fourier Transform* (STFT) yang melakukan transformasi dari sinyal domain waktu 1-D menjadi sinyal domain waktu-frekuensi. Transformasi STFT ini diperoleh dengan melakukan segmentasi sinyal ke dalam interval waktu yang lebih sempit, kemudian dilakukan transformasi fourier pada masing-masing segmen.

Sebelum menentukan posisi hiposenter awal, parameter dasar berikutnya yang ditentukan adalah waktu terjadinya MEQ atau *origin time*. Penentuan waktu terjadinya MEQ ini dapat dilakukan dengan menggunakan diagram Wadati, yaitu memplot antara selisih waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S, terhadap waktu kedatangan gelombang P. Kemudian ditarik garis lurus yang mewakili titik-titik yang sudah diplot tadi sehingga garis tersebut memotong di sumbu waktu kedatangan gelombang P (T_p), atau $T_s - T_p$ adalah 0. Oleh karena di hiposenter selisih waktu antar gelombang P dan S adalah nol ($T_s - T_p = 0$), maka itulah pendekatan waktu terjadinya *microearthquake*. Kemudian dengan parameter-parameter yang sudah diperoleh tadi, maka langkah selanjutnya adalah melakukan penentuan hiposenter awal.

Relokasi hiposenter bertujuan untuk mendapatkan model hiposenter yang presisi. Suatu model yang presisi dapat memberikan informasi mengenai lokasi sumber dan penyebab gempa bumi, apakah gempa-gempa mikro tersebut terjadi di daerah Geotermal. Terdapat berbagai macam metode relokasi yang sering dipakai; *Master Event Method*, *Average Residual Method*, *Homogeneous Station Method*, *Joint Hypocenter Method* dan *Double Difference*. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan untuk relokasi hiposenter adalah *double difference*. Metode tersebut merupakan salah satu teknik relokasi gempa yang efisien dalam memodelkan hiposenter karena dapat dilakukan secara cepat dan menghasilkan *error* yang lebih kecil.

Ada asumsi yang digunakan pada metode *double difference*, yaitu ketika jarak antara *event* lebih kecil dari jarak *event* dengan stasiun. Dengan asumsi tersebut dapat dikatakan bahwa kedua *event* tersebut memiliki *raypath* yang identik sehingga dengan menyalisihkan *travel time* kedua gempa yang terekam pada stasiun yang sama maka akan mendapatkan nilai residual yang lebih rendah tanpa menggunakan koreksi stasiun.

Parameter mekanisme sumber dapat ditentukan dengan analisis polarisasi gelombang P serta inversi tensor momen. Penentuan dengan impuls pertama gelombang P lebih bersifat subjektif, apalagi jika konfigurasi/geometri sensornya tidak merata, sedangkan penentuan dengan inversi tensor momen relatif lebih objektif dalam menentukan model sumber gempabumi karena berhubungan linier dengan parameter yang terukur di seismometer yaitu perpindahan (*displacement*). *Displacement* berhubungan secara linier terhadap tensor momen sehingga memungkinkan untuk melakukan inversi dengan mudah dari data gelombang seismik untuk mendapatkan mekanisme sumber melalui metode "*Least Square*". Tensor momen (M) ditentukan melalui kombinasi pasangan gaya (*force couples*) dan dipol gaya (*force dipole*). Dalam bentuk matrik dapat dirumuskan pada persamaan 1 sebagai berikut.

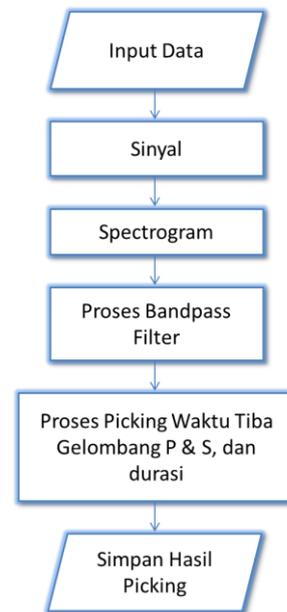
$$M = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Tomografi merupakan metode yang mana *travel times* dari gelombang P dan S digunakan untuk menghitung struktur kecepatan 3-D. Inversi tomografi dari data MEQ dapat memberikan variasi 3-D pada parameter seperti kecepatan gelombang P dan S dan rasio *Vp/Vs*. Pengulangan inversi tomografi dari waktu ke waktu dapat memberikan evaluasi *time-lapse* dari variasi *Vp/Vs*, dalam reservoir yang dapat dikaitkan terhadap penarikan dan pelepasan fluida. Variasi waktu dari rasio *Vp/Vs* di lapangan Geotermal telah digunakan untuk mengevaluasi penipisan fluida dari waktu ke waktu dan menilai konsentrasi cadangan uap dan batas reservoir (Colombo & Foulger, 2005).

PEMBUATAN SOFTWARE DAN PENGOLAHAN DATA

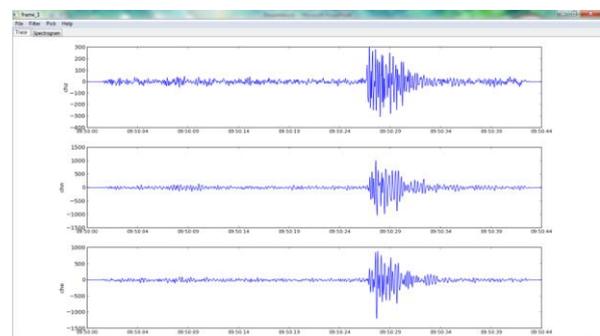
Ada beberapa tahapan dalam pengolahan data MEQ yang dilakukan dengan *software* yang dikembangkan sendiri oleh penulis. *Software* yang dibuat adalah *software* yang digunakan untuk melakukan analisis data MEQ berupa sinyal gelombang, baik itu gelombang P, maupun gelombang S. Kemudian dilakukan penentuan waktu tiba

gelombang P dan S, dan durasi dengan menggunakan spektrogram. Setiap stasiun pengukuran MEQ akan merekam tiga komponen sinyal, yaitu satu sinyal arah vertikal (z) dan dua sinyal arah horizontal (N-S dan E-W). Secara umum alur pengolahan data pada *software* ini dapat dilihat pada Gambar 1.

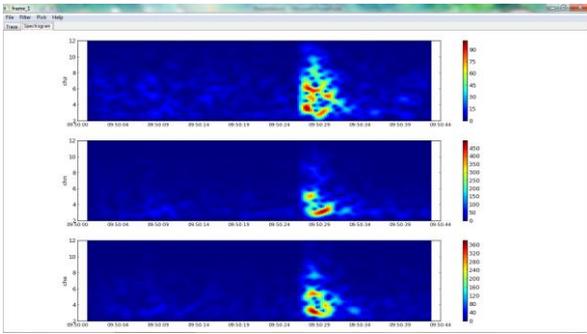


Gambar 1. Flow chart software analisis sinyal

Langkah pertama yang dilakukan pada *software* ini adalah melakukan *input* data mentah menggunakan menu *File* yang mana masing-masing stasiun MEQ terdiri dari tiga komponen data, yaitu satu data komponen vertikal (z) dan dua data komponen horizontal (N-S dan E-W). Berikutnya ketiga komponen data tersebut akan tampil dalam bentuk sinyal waktu, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Data yang baik adalah data yang memiliki gelombang P dan S yang jelas.

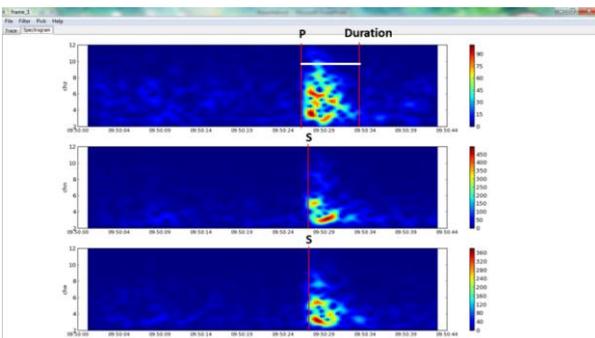


Gambar 2. Hasil plot sinyal MEQ



Gambar 3. Tampilan spektrogram

Penentuan waktu tiba gelombang P dilakukan pada seismogram sumbu vertikal (sb Z). Untuk menentukan waktu tiba gelombang S, *picking* dilakukan pada seismogram horisontal dimana amplitudo gelombang akan naik secara signifikan. Dalam penentuan durasi sinyal, *picking* dilakukan pada seismogram horisontal.



Gambar 4. Penentuan waktu tiba dan durasi dalam bentuk spektrogram

Proses penghitungan hiposenter dilakukan menggunakan *software* yang dikembangkan USGS, yaitu Hypo71 (U.S Geological Survey, 1975). Dalam proses iterasinya, Hypo71 menggunakan algoritma geiger untuk menghitung lokasi hiposenter.

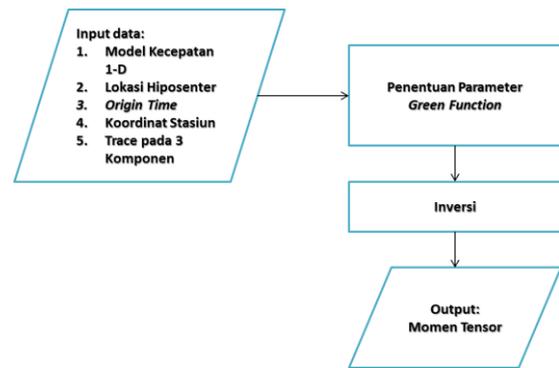
Gambar 5 merupakan *file output* Hypo71 yang menampilkan hasil penghitungan hiposenter meliputi posisi, magnitudo, *origin time* dan beberapa parameter *error* dalam proses penghitungan. DATE dan ORIGIN masing-masing merupakan tanggal dan waktu terjadinya gempa mikro. LAT S dan LONG E merupakan posisi gempa mikro dalam *degree*. DEPTH dan MAG masing-masing merupakan kedalaman gempa dalam kilometer dan magnitudo dalam SR.

DATE	ORIGIN	LAT S	LONG E	DEPTH	MAG	NO	GAP	IMIN
RMS	ERH	ER2	QM					
71227	443	36.05	7- 9.43	107-37.61	.80	.85	9	96
.17	.4	1.1	B1					.7

Gambar 5. File output Hypo71 untuk format *.PUN

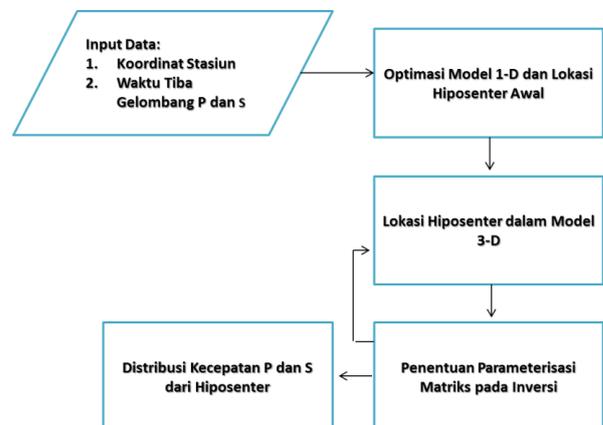
Model hiposenter awal *output* dari Hypo71 masih memiliki kekurangan, salah satunya masih memiliki nilai *error residual* yang besar akibat struktur kecepatan yang belum

termodelkan dengan baik. Untuk itu, proses memperbaiki model hiposenter awal dengan merelokasinya sangat perlu dilakukan. Penggunaan metode *double difference* dapat dilakukan dengan program yang juga dikembangkan USGS, yaitu HypoDD. Model kecepatan yang digunakan sama dengan yang digunakan pada penghitungan hiposenter dengan hypo71. Terdapat tujuh buah lapisan dengan nilai kecepatan yang bervariasi. Rasio V_p/V_s yang digunakan 1.79. Model kecepatan digunakan untuk mendapatkan waktu kalkulasi dimana parameter tersebut digunakan dalam penghitungan *double difference*. *Output* yang dihasilkan dari proses relokasi menggunakan HypoDD adalah perubahan lokasi hiposenter dari model hiposenter awal. Sokos dan Zahradnik (2009) menyatakan bahwa penentuan tensor momen dilakukan dengan melakukan *input* berupa model kecepatan 1-D, lokasi hiposenter, *origin time*, dan sinyal (Gambar 6).



Gambar 6. Bagan proses penentuan tensor momen

Pemodelan tomografi diawali dengan melakukan perhitungan struktur kecepatan 3-D dari *travel times* gelombang P dan S. Setelah itu dilakukan inversi tomografi untuk memperoleh parameter struktur kecepatan gelombang P dan S, dan rasio V_p/V_s dan koordinat hiposenter. Kemudian *output* yang diperoleh berupa masing-masing peta persebaran anomali kecepatan P, anomali kecepatan S, dan rasio V_p/V_s (Gambar7).



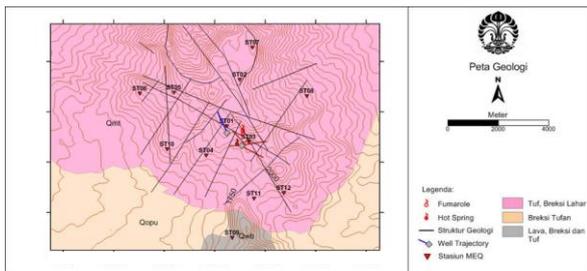
Gambar 7. Bagan proses pemodelan tomografi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem geotermal di wilayah ini memiliki tipe stratovulkanik andesit yang memiliki luas area prospek sekitar 40 km² dan berada pada ketinggian 1280 meter hingga 2341 meter di atas permukaan laut. Lapangan ini berada pada basin vulkanik Sunda yang terbentuk sebagai hasil adanya zona

subduksi antara lempeng Australia dan lempeng Eurasia. Akibat lempeng Australia yang terus menekan ke utara menimbulkan stress horisontal yang cukup tinggi sehingga menciptakan patahan strike-slip dari utara hingga timur laut dimana patahan tersebut sangat berperan dalam distribusi sumber panas dan juga zona permeabel pada beberapa sistem geotermal terkait. Sistem geotermal daerah X diinterpretasikan sebagai tipe transisi antara sistem dominasi uap dan sistem dominasi air dimana bagian utara memproduksi fluida dengan dominasi uap sementara di bagian selatan memiliki fluida dengan fraksi uap yang lebih rendah.

Batuan yang terdapat pada daerah penelitian MEQ didominasi oleh tuf, breksi, dan lava. Batuan dengan simbol Qmt yang terdiri dari batuan tuf dan breksi lahar memiliki umur Quarter paling muda dibandingkan dengan batuan lainnya. Batuan dengan simbol Qwb yang berisikan batuan lava, breksi, dan tuf berumur paling tua (Gambar 8).

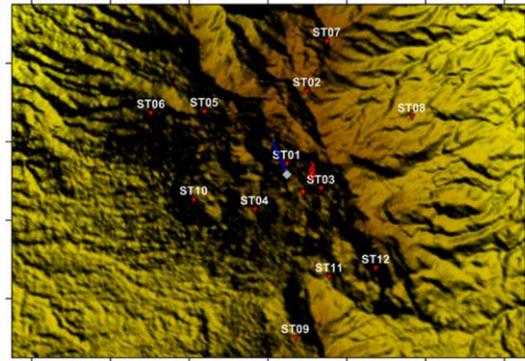


Gambar 8. Peta geologi daerah penelitian MEQ

Di daerah penelitian MEQ terdapat manifestasi berupa Kawah *fumarole* yang berada pada zona reservoir didominasi uap. Pada zona reservoir tersebut diyakini memiliki lapisan *brine* yang terletak di bawah zona uap. Ini adalah zona yang paling produktif karena kebanyakan adalah sumur produksi uap kering.

Kawah *Fumarole* ini memiliki 3 lokasi kecil yang terdistribusi pada elevasi sekitar 2062 – 2051 masl dengan interval temperatur sekitar 91 – 94 °C. Berdasarkan pengamatan fisik yang dilakukan diketahui bahwa alterasi terdistribusikan secara luas dan meningkat intensitasnya ke selatan, sementara aktivitas termal menurun.

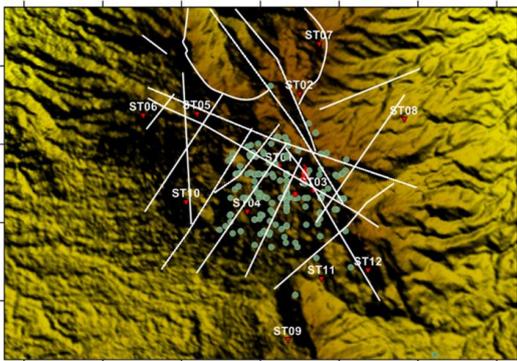
Data rekaman gempa yang digunakan berasal dari rekaman selama sebelum injeksi dan pada saat injeksi. Seismogram yang digunakan sudah dipotong sesuai jumlah sinyal yang diduga merupakan *event* gempa. Jumlah *event* gempa yang berhasil didapatkan adalah sekitar 237 *event* dengan kualitas yang bervariasi mulai dari sangat baik hingga *noisy*. Kualitas data ditentukan secara kualitatif berdasarkan kejelasan waktu tiba gelombang P dan S. Dalam catatan tersebut terdapat informasi mengenai *event* yang telah berhasil dianalisis dan dilakukan *picking*. Selain data seismogram gempa mikro, terdapat juga data pendukung terkait aktivitas produksi sebelum dan pada saat reinjeksi. Data debit fluida injeksi juga disajikan bersamaan dengan fluktuasi tekanan kepala sumur produksi. Gambar 9 merupakan desain survei MEQ dimana sumur injeksi ditunjukkan oleh garis biru, terletak dekat dengan stasiun ST01.



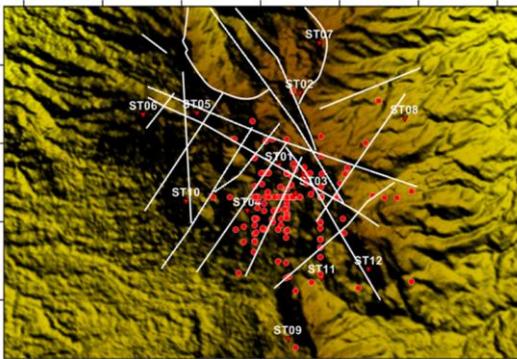
Gambar 9. Distribusi stasiun MEQ

Pada bagian hasil perhitungan hiposenter ditampilkan hasil dari tiga tahapan yang dilakukan untuk memperoleh lokasi hiposenter. Hasil dari tahapan pertama yang merupakan hasil perhitungan hiposenter dengan Hypo71 ditunjukkan melalui peta distribusi hiposenter pada Gambar 10 dan Gambar 11. Pada Gambar 10, *input* data Hypo71 merupakan hasil penentuan waktu tiba gelombang P dan S, dan durasi berdasarkan sinyal waktu yang dilakukan oleh Munazyi (2013) menggunakan *software* seisgram2k. Adapun pada Gambar 11, *input* data Hypo71 merupakan hasil penentuan waktu tiba gelombang P dan S, dan durasi berdasarkan spektrogram dari *software* yang peneliti kembangkan yang mana sudah diseleksi kualitas datanya. Dengan demikian tidak ada sinyal yang memiliki kualitas yang kurang baik yang dijadikan *input* untuk proses penentuan hiposenter ini. Namun, dari Gambar 10 dan Gambar 11 tersebut dapat dilihat bahwa ada beberapa lokasi hiposenter yang terdistribusi sejajar arah Utara dan Barat. Kondisi tersebut dapat dikatakan kurang realistis. Hal tersebut dapat disebabkan oleh nilai *residual error* yang relatif tinggi akibat struktur kecepatan yang belum termodelkan dengan baik. Oleh karena itu pada tahap kedua perlu dilakukan perbaikan lokasi hiposenter awal tersebut dengan relokasi hiposenter menggunakan metode *double difference*.

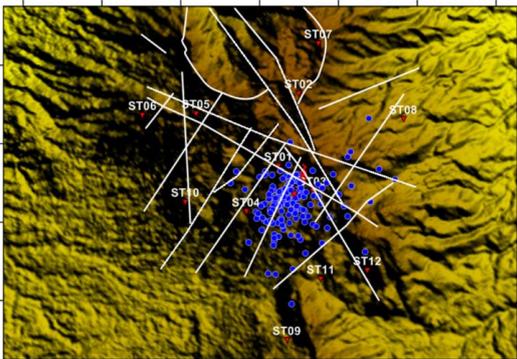
Hasil distribusi hiposenter hasil relokasi hiposenter awal berdasarkan penentuan waktu tiba dan durasi menggunakan spektrogram dapat dilihat pada Gambar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa hasil relokasi cenderung lebih fokus dan berkaitan dengan pola struktur geologi permukaan. Walaupun ada koreksi yang dilakukan pada proses relokasi hiposenter dengan metode *double difference*, tetapi struktur kecepatan yang digunakan masih dalam bentuk model 1-D. Dengan demikian pada tahap ketiga perlu dilakukan perhitungan lokasi hiposenter dengan menggunakan pemodelan 3-D dengan menggunakan 3-D *ray tracing*. Dalam proses pemodelan 3-D ini, *travel time* dan posisi stasiun MEQ juga digunakan sebagai *input*. Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa distribusi hiposenter model 3-D lebih terfokus pada zona rekahan yang terdapat pada perpotongan struktur dibandingkan dengan distribusi hasil relokasi hiposenter *double difference*. Hasil model 3-D tersebut lebih sesuai karena umumnya *event* akan banyak muncul di daerah zona rekahan.



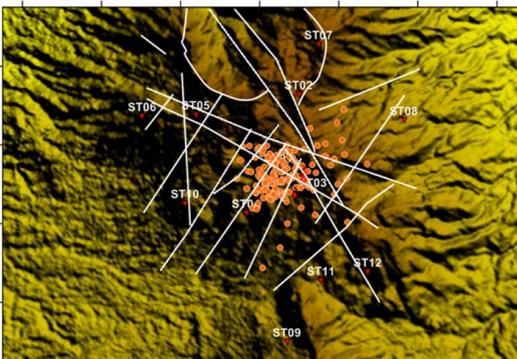
Gambar 10. Distribusi hiposenter awal (sinyal waktu)



Gambar 11. Distribusi hiposenter awal (spektrogram)

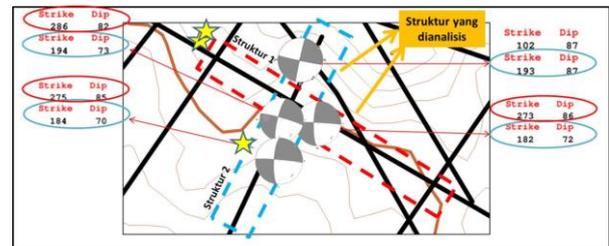


Gambar 12. Distribusi hiposenter setelah proses relokasi



Gambar 13. Distribusi hiposenter setelah hasil dalam model 3-D

Hasil perhitungan tensor momen ditunjukkan dengan pola *beach ball* yang merepresentasikan arah strike dan dip. Dari Gambar14 diperlihatkan pola *beach ball* secara lebih jelas. Dari Gambar14 tersebut dapat diketahui bahwa terdapat dua arah strike dan dip dari masing-masing *beach ball* yang menunjukkan adanya dua kemungkinan bidang patahan. Selain itu pola *beach ball* tersebut menunjukkan bahwa patahannya adalah *strike-slip*. Dalam hal ini pola bidang patahan dari hasil tensor momen dikorelasikan dengan salah satu garis struktur geologi permukaan yang mana sesuai dengan salah dua bidang patahan. Patahan pertama yang bernama struktur 1 memiliki arah strike berkisar $273^{\circ} - 286^{\circ}$ dan dip $82^{\circ} - 86^{\circ}$, sedangkan struktur 2 memiliki arah strike antara $182^{\circ} - 194^{\circ}$ dan dip antara $70^{\circ} - 87^{\circ}$ (Gambar14). Dari hasil pengamatan geologi di Lapangan, dapat diperoleh data hasil strike dan dip sesuai dengan struktur 2 dengan nilai strike berkisar $150^{\circ} - 195^{\circ}$ dan dip $50^{\circ} - 70^{\circ}$. Titik - titik pengamatan tersebut ditandai simbol bintang berwarna kuning pada Gambar14.

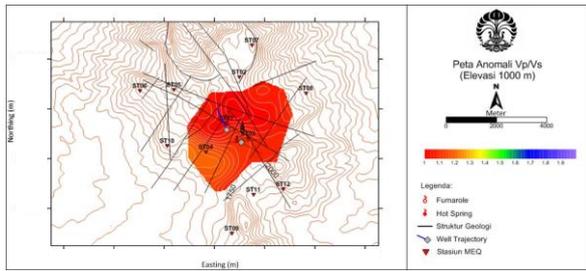


Gambar14. Arah strike dan dip dari *beach ball*

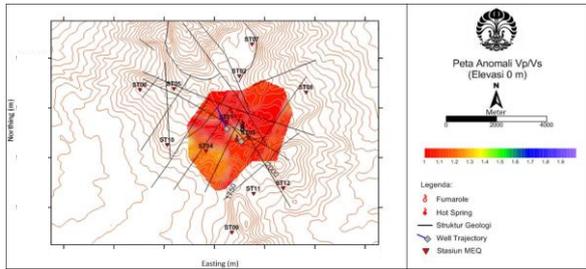
Untuk hasil analisis tomografi, anomali V_p/V_s cenderung memperlihatkan pola yang berbeda dengan anomali kecepatan P dan S. Pada elevasi 1000 m terlihat rasio V_p/V_s didominasi dengan anomali rendah (

Gambar15). Kemudian pada elevasi 0 m, mulai terlihat ada daerah bagian Barat daya yang nilai V_p/V_s nya mulai meningkat, sedangkan di daerah lainnya nilai V_p/V_s nya lebih rendah (Gambar16). Pada elevasi -1000 m lebih terlihat jelas bahwa di daerah yang terdapat *fumarole* tetap memiliki anomali yang rendah (Gambar17). Anomali V_p/V_s rendah ini mengindikasikan bahwa di daerah tersebut memiliki karakter *highly fracture*, *highest temperature*, dan *vapor dominated*. Anomali V_p/V_s rendah tersebut juga dapat mengindikasikan bahwa di daerah tersebut merupakan daerah *upflow zone*.

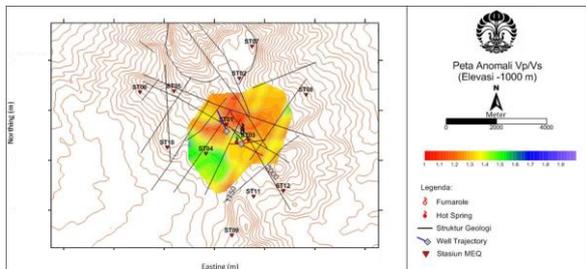
Adanya zona yang memiliki temperatur tinggi pada lapisan bawah permukaan akan memberikan pengaruh yang bervariasi pada nilai V_p dan V_s . Pada daerah *vapor dominated* nilai V_p dan V_s akan cenderung menurun, namun penurunan nilai V_p cenderung lebih signifikan dibandingkan dengan nilai V_s . Dengan demikian nilai rasio V_p/V_s pada daerah tersebut cenderung kecil. Sebaliknya, pada daerah *water dominated* nilai V_p dan V_s akan cenderung menurun juga, namun penurunan V_p cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan *vapor dominated* sehingga nilai rasio V_p/V_s cenderung lebih tinggi. Pada elevasi -2000 m ditunjukkan hal yang cukup menarik dimana pola anomali tinggi dan rendah hampir sama dengan elevasi -1000 m, namun secara keseluruhan rasio V_p/V_s nya meningkat (Gambar18). Hal ini kemungkinan disebabkan nilai V_p dan V_s yang cenderung menurun, namun penurunan V_s jauh lebih signifikan sehingga nilai rasio V_p/V_s cenderung lebih tinggi. Hal ini dapat disebabkan karena dari elevasi -2000 m ke -1000 m terjadi perubahan fase dari *liquid* menjadi *vapor*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa *top of brine* berada pada elevasi sekitar -2000 m.



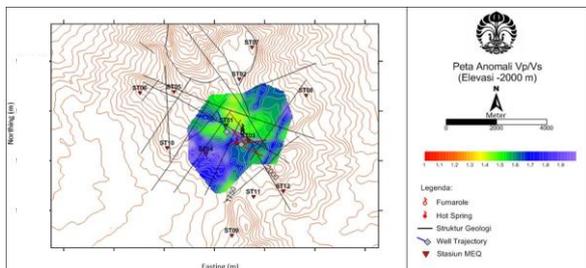
Gambar 15. Peta Anomali Kecepatan Vp/Vs pada elevasi 1000 m



Gambar 16. Peta Anomali Kecepatan Vp/Vs pada elevasi 0 m



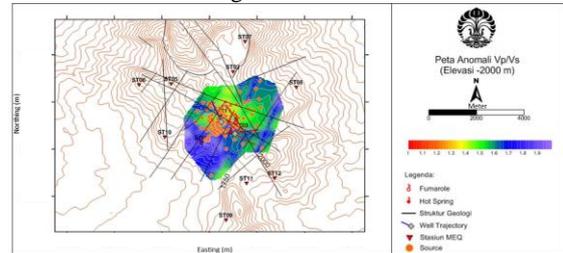
Gambar 17. Peta Anomali Kecepatan Vp/Vs pada elevasi -1000 m



Gambar 18. Peta Anomali Kecepatan Vp/Vs pada elevasi -2000 m

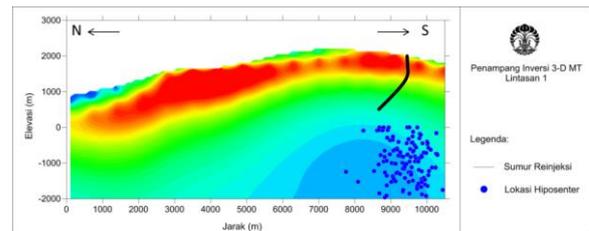
Apabila hasil anomali Vp/Vs dan distribusi hiposenter dibandingkan, maka akan terlihat korelasi yang cukup menarik dimana sebagian besar lokasi hiposenter terdistribusi di daerah yang memiliki rasio Vp/Vs yang relatif rendah dibandingkan dengan daerah sekitarnya (Gambar 19). Umumnya *microearthquake event* akan terjadi pada daerah-daerah yang memiliki rekahan. Dalam hal ini,

lokasi hiposenter lebih banyak terdistribusi di daerah yang terdapat perpotongan struktur geologi permukaan. Selain itu hiposenter tersebut berada di dekat daerah yang memiliki manifestasi berupa *fumarole*. Daerah yang memiliki manifestasi *fumarole* tersebut dapat dikatakan sebagai daerah *upflow* yang mana hal tersebut diperkuat dengan adanya nilai Vp/Vs yang rendah di daerah tersebut. Dengan demikian hasil ini saling berkaitan satu sama lain.



Gambar 19. Peta Anomali Vp/Vs dan Distribusi Hiposenter

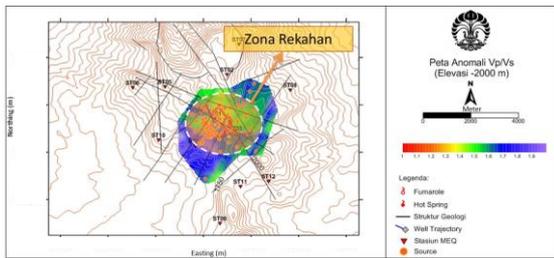
Untuk semakin memperkuat analisis, peneliti membandingkan hasil data MEQ dan Magnetotellurik (MT). Dalam hal ini data MT yang digunakan adalah hasil inversi 3-D. Berdasarkan analisis sebelumnya telah dijelaskan bahwa rasio Vp/Vs rendah dapat juga mengindikasikan daerah *upflow*. Ternyata hal ini juga dikonfirmasi dengan data MT lintasan utara-selatan yang menunjukkan di daerah dengan rasio Vp/Vs rendah memperlihatkan adanya *up dome* yang mengindikasikan daerah *upflow* (Gambar 20). Selain itu, hal ini diperkuat dengan adanya *fumarole* di bagian permukaan yang umumnya juga mengindikasikan daerah *upflow*.



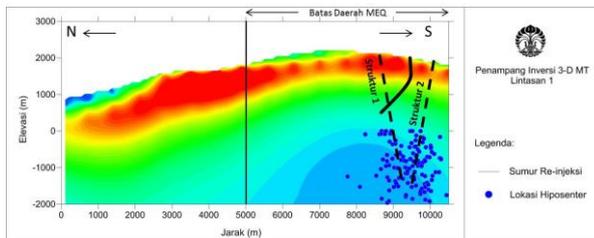
Gambar 20. Penampang Inversi 3-D MT Lintasan 1 dan Lokasi Hiposenter

Berdasarkan dari seluruh hasil analisis pada bagian sebelumnya, maka dapat ditentukan perkiraan zona rekahan di daerah penelitian. Gambar 21 menunjukkan peta perkiraan zona rekahan di daerah penelitian dimana sebagian besar hiposenter dan nilai rasio Vp/Vs rendah terdistribusi di daerah tersebut. Selain itu hal tersebut juga dikonfirmasi dengan adanya perpotongan sejumlah struktur yang diperoleh dari struktur geologi permukaan.

Kemudian peneliti juga memperkirakan proyeksi struktur bawah permukaan dari hasil analisis tensor momen sebelumnya dan menempatkan struktur tersebut pada penampang MT yang ditunjukkan pada Gambar 22. Pada Gambar 22 tersebut dapat diketahui bahwa struktur 1 memiliki arah strike 270 ° - 290 ° dan dip 80 ° - 90 °. Diperkirakan sumur reinjeksi memotong struktur 1 tersebut. Kemudian struktur 2 memiliki arah strike 180 ° - 195 ° dan dip antara 70 ° - 90 ° yang dalam hal ini arah dip-nya berkebalikan dengan struktur 1. Pada kasus ini kemungkinan arah struktur bawa permukaan dari data MEQ memperlihatkan adanya kesesuaian dengan pola kontur data MT.



Gambar 21. Perkiraan Zona Rekahan



Gambar 22. Perkiraan Struktur Bawah Permukaan

KESIMPULAN

Penelitian mengenai pembuatan *software*, identifikasi zona rekahan dan analisis proses injeksi fluida di Lapangan X dengan metode MEQ dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dengan menggunakan *software* yang dikembangkan sendiri, dapat dilakukan penentuan waktu tiba dan durasi dalam bentuk spektrogram.
2. Distribusi hiposenter awal berdasarkan penentuan waktu tiba gelombang P dan S, dan durasi, baik dari sinyal waktu maupun spektrogram masih belum realistis sehingga perlu dilakukan proses relokasi hiposenter dan perhitungan hiposenter menggunakan model 3-D.
3. Hasil distribusi hiposenter model 3-D memiliki keterkaitan dan kesesuaian dengan struktur geologi permukaan yang mengindikasikan keberadaan zona rekahan.
4. Anomali V_p/V_s rendah menunjukkan daerah tersebut merupakan *highest temperature, highly fracture*, dan *vapor dominated*. Selain itu rasio V_p/V_s rendah juga mengindikasikan daerah *upflow*.
5. Persebaran fluida injeksi berdasarkan hasil distribusi hiposenter dapat diprediksi cenderung ke arah Selatan.
6. Hasil data MEQ berupa anomali V_p/V_s dan distribusi hiposenter saling berkaitan. Demikian halnya dengan data geologi struktur permukaan, MEQ dan MT yang juga memiliki kesesuaian dalam hal penentuan zona rekahan dan kemungkinan struktur bawah permukaan.

SARAN

Untuk meningkatkan kelengkapan penelitian terkait identifikasi zona rekahan di lapangan Geotermal Daerah X, maka ada beberapa saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Konfirmasi zona rekahan, zona permeabel, dan struktur di bawah permukaan perlu dilakukan lebih baik lagi untuk meningkatkan ketepatan analisis dan menambah kelengkapan proses studi.
2. Perlu dilakukan analisis *source type* lebih lanjut untuk dapat meyakinkan terhadap dugaan apakah

microearthquake yang dihasilkan berasal dari ekstraksi uap, injeksi fluida ataupun aktivitas vulkanik.

REFERENSI

Aki, K., dan A. Richards. (2002). *Quantitative Seismology, Theory and Method*. Edisi II, W.H. Freeman and Co., USA.

Bogie, Ian. Yudi Indra K, Merry CW. (2008). *Overview of the "X" Geothermal Field, West Java, Indonesia*. Bulletin of Science Direct Geothermic 37 pp 347-365

Heditama, D.M. (2014). *Pengembangan Software Analisis Spektrogram dan Studi Tomografi Data MEQ untuk Delineasi Zona Rekahan di Daerah Geotermal*. Program Magister Eksplorasi Geotermal, UI, Salemba

Koulakov, I. (2009). *A LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 1, pp. 194-214.

Kayal.JR. (2008). *Microearthquake Seismology and Seismotectonics of South Asia*. Springer : New York

Malik, Dwiyoarani. dan Rusitadi, Ali A. (2012). *Surface Thermal Manifestation Evolution Under Exploitation Stage in "X" Field*. Proceedings PIT API XII, Bandung.

Mujihardi, B., Widarto, D. A., Nugraha, A. D, Widiyantoro, S. (2012). *Careful Picking of P- and S-wave Arrival Times of Microseismic Data for Accurate Hypocenter Determination*. Proceeding PIT HAGI, Palembang

Munazyi (2013). *Identifikasi Struktur (Zona Permeabel) Sistem Panasbumi "X" dengan Menggunakan Metode Microearthquake*, Program Geofisika, FMIPA UI, Depok.

Pramono, Bambang dan Daniele Colombo.(2005). *Microearthquake Characteristicsin Darajat Geothermal Field, Indonesia*.WGC 2005, Turkey.

Rasmid. 2012. *Seismisitas Daerah Utara Cekungan Bandung*. Program Studi Sains Kebumihan, ITB, Bandung.

Sokos, Efthimios. dan Zahradnik, Jiri. (2009). *A Matlab GUI for use with ISOLA Fortran codes*. University of Patras dan Charles University in Prague.

U.S. Geological Survey. (1975). *Hypo71(Revised) : A Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude and First Motion Pattern of local Earthquake*. Menlo Park, California.

Waldhauser, F. Ellsworth,W.L. (2000). *A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California*. Bulletin of the Seismological Society of America vol 90.6. pp 1353-1368.

Waldhauser, F. (2001). *hypoDD – A Program to Compute Double Difference Hypocenter Locations*. U.S. Geological Survey.