

Delineation of Geothermal System at Prospect Area ‘P’ by Using Multi-Dimensional Modeling of Magnetotelluric Data Integrated Geological and Geochemistry Data

Puji Suharmanto¹, Fikri Fahmi², Yunus Daud¹, Ahmad Zarkasyi³, Asep Sugiyanto³, and Edi Suhanto³

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

²PT. NewQuest Geotechnology, Indonesia

³Center for Geological Resources, Geological Agency, Indonesia

harmansuharmanto@gmail.com

Keywords: Prospect zone, Geothermal system, Magnetotelluric method, Multi-dimension modeling.

ABSTRACT

A study for delineating geothermal system of prospect area “P” has been done by using multi-dimensional modeling of magnetotelluric data. Physiographically, geothermal prospect of “P” area is located at non-volcanic Banda inner arc hosted by Malihan Sekis rock complex with Perm-Triassic age. The existence of geothermal system in this area is indicated by the presence of thermal manifestations in form of 6 chloride-bicarbonate hot springs with temperature in the range of 37 – 67°C, and pH of 6-7. The development of geothermal system is most probably associated with strong tectonic activity caused by the collision between Seram island plate and Australian plate that ignite the occurrence of intrusive body as heat source. In order to know the subsurface information of prospect area, magnetotelluric (MT) survey has been done. The processing of MT data was started from time-series data, continued by noise filtering, rotation of strike orientation and static shift correction to obtain better MT curve. The data were then being inverted by means of 1-Dimensional, 2-Dimensional and 3-Dimensional inversion methods. Reservoir temperature is estimated to be around 160-180°C and classified as moderate temperature. The result of MT data inversions shows the presence of conductive layer (<15 Ωm) with 500 – 1000 m thickness that is interpreted as clay cap of geothermal system. High resistivity zone (>300 Ωm) with up dome shape appears underneath the manifestations occurrence (MAP1, MAP2, MAP4, and MAP5), indicating that the heat source is located in northern part and elongate to southeast direction. The conceptual model of geothermal system was built based on integrated interpretation of geological, geochemical and geophysical data. The prospect area and recommendation of drilling location is estimated to be ± 3 km² around upflow zone.

PENDAHULUAN

Biaya pemboran sumur panasbumi berkisar antara 2-5 kali lebih tinggi daripada sumur migas dengan kedalaman yang sama. Berdasarkan hal tersebut, keberhasilan pada tahapan eksplorasi panasbumi sangatlah penting guna memprediksi dan merekomendasi titik pemboran dengan tepat dan akurat sehingga dapat mengurangi tingkat kegagalan pemboran dan resiko kerugian. Kriteria target pemboran adalah area yang memiliki temperatur dan permeabilitas yang tinggi, untuk itu diperlukan eksplorasi panasbumi terpadu terdiri dari survei 3G (Geologi, Geokimia, dan Geofisika) dalam menghasilkan konseptual model terpadu akurat dalam menentukan target titik pemboran. Terdapat beberapa metode geofisika yang

biasa digunakan dalam eksplorasi panasbumi, salah satunya adalah metode magnetotelurik.

Metode magnetotelurik merupakan metode yang paling sering digunakan dalam eksplorasi panasbumi. Metode magnetotelurik (MT) adalah salah satu metode geofisika elektromagnetik pasif dengan memanfaatkan variasi medan magnet bumi sebagai sumbernya. Variasi medan magnet bumi ini disebabkan karena beberapa faktor seperti *solar wind* dan *lightning*. Variasi medan magnet bumi ini dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan rentang frekuensi yang sangat lebar yaitu antara 10⁻⁵-10⁴ Hz (Daud, 2013).

Delineasi sistem panasbumi berdasarkan nilai resistivitas batuan bawah permukaan diperoleh dari melakukan pengolahan data magnetotelurik kemudian diproses dengan membuat pemodelan inversi mutli dimensi 1D, 2D dan 3D data magnetotelurik seperti yang dijelaskan pada kasus *Glass Mountain*. Penyelidikan panasbumi di daerah tersebut dilakukan pemodelan 1D, 2D, dan 3D serta analisa *clay* dari pemodelan 1D dan 3D. Hasil yang diperoleh, bahwa pemodelan inversi 1D dapat memberikan gambaran kasar mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan namun dengan batasan tepi yang masih belum akurat dan sempurna (Cumming and Mackie, 2010). Inversi 1D dapat diterapkan dengan asumsi bahwa bumi adalah homogen lateral sehingga nilai resistivitas bawah permukaan hanya bervariasi dalam orientasi vertikal (Heditama et al., 2012).

Sementara itu, pemetaan resistivitas bawah permukaan yang lebih baik dapat dihasilkan dari pemodelan inversi 2D. Akan tetapi untuk mendapatkan pemetaan resistivitas bawah permukaan yang akurat, pemodelan dengan hasil inversi ini memerlukan ketelitian yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan, pengolahan inversi 2D berpeluang besar terhadap efek statik di dalam data dan sangat memerlukan kejelasan arah *strike* (Cumming and Mackie, 2010). Inversi 2D mengasumsikan bahwa bumi bervariasi satu orientasi lateral dan kedalaman, sementara orientasi lain dianggap homogen (Heditama et al., 2012). Inversi 2D adalah jenis inversi yang paling sering digunakan saat ini dengan mengasumsikan bumi secara 2D. Namun, pada prakteknya hasil inversi 2D sering mengalami keterbatasan. Hasil dari inversi 2D dapat terpengaruh oleh keberadaan struktur 3D seperti yang didemonstrasikan dengan menggunakan data sintetik oleh Siripunvaraporn et al. (2003) dan Iskandar (2013) dan dengan menggunakan data real oleh Amriyah (2012). Dari semua studi tersebut menunjukkan bahwa jika ada struktur 3D, maka inversi 2D dapat menghasilkan interpretasi yang menyimpang. (Fahmi, 2013).

Pemodelan inversi 3D akan dapat membantu interpretasi sistem panasbumi menjadi lebih baik dalam hal menampilkan penyebaran resistivitas batuan bawah permukaan. Hal ini dikarenakan dengan inversi 3D kita akan

memperoleh informasi mengenai ketebalan *Clay Cap* pada daerah tersebut. Dari seluruh penjelasan di atas terlihat bahwa pengintegrasian hasil inversi 1D, 2D, dan 3D merupakan langkah yang dapat dilakukan guna memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan (Cumming and Mackie, 2010). Inversi 3D lebih representatif dengan kondisi bumi nyata dengan asumsi bahwa nilai resistivitas bervariasi baik lateral dan vertikal. (Heditama et al., 2012)

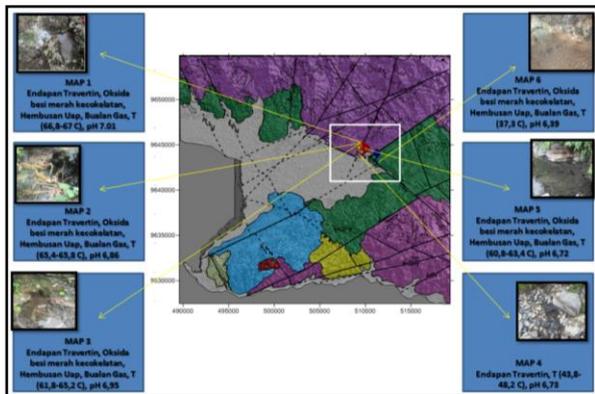
Kemampuan dari inversi 3D dalam menggambarkan struktur resistivitas dengan resolusi yang tinggi menjadi modal penting dalam perkembangan metode MT ke depannya karena keterbatasan dari inversi 2D yang seringkali tidak dapat menjelaskan bagian penting yang ada dalam data lapangan dengan kondisi geologi yang kompleks (Siripunvaraporn et al., 2003).

Oleh karena itu, dalam upaya mendelineasi zona prospek sistem panasbumi di daerah penelitian maka penulis melakukan penelitian mengenai pemodelan inversi multi dimensi sistem panasbumi. Model sistem panasbumi terpadu yang diperoleh akan digunakan sebagai pertimbangan utama dalam menentukan rekomendasi area target pemboran.

TINJAUAN LAPANGAN

Manifestasi Permukaan

Manifestasi permukaan gejala panas bumi pada daerah penelitian terdiri dari enam Mata Air Panas (MAP) yang muncul di beberapa lokasi. Secara umum temperatur air panas berkisar antara 37–67°C dengan pH cenderung netral (Gambar 1).



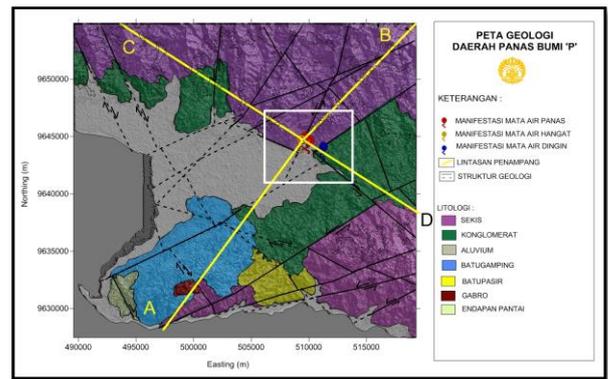
Gambar 1. Manifestasi Permukaan Daerah Penelitian (dimodifikasi PSDG, 2014)

Litologi, Stratigrafi, dan Struktur Geologi

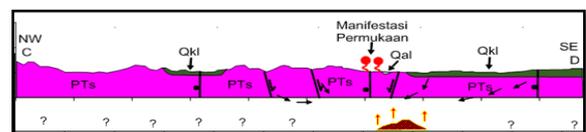
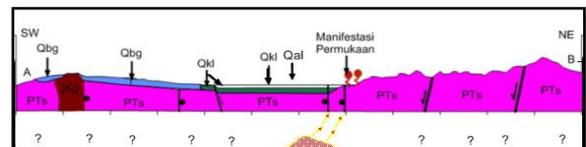
Litologi batuan yang menyusun daerah ini diperlihatkan pada Gambar 2 & Gambar 3 terdiri dari batuan malihan, batuan beku, batuan sedimen, dan endapan permukaan. Urutan satuan batuan atau stratigrafi dari tua ke muda adalah satuan sekis (PTs), gabro (Jkg), batupasir (TQp), batugamping (Qbg), konglomerat (Qkl), endapan pantai (Qep), dan aluvium (Qal).

Satuan batuan sekis ini merupakan batuan malihan yang berasal dari perselingan antara batupasir dengan batu lempung, dan dilihat dari peta geologi regional lembar

Ambon dan Masohi, batuan ini merupakan batuan malihan bagian dari Formasi ‘P’ yang berumur Perm-Trias (Tjokrosapoetra, 1993).

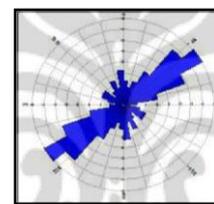


Gambar 2 Peta Geologi Daerah Penelitian (dimodifikasi dari PSDG, 2014)



Gambar 3 Penampang Geologi Lintasan A-B & C-D Daerah Penelitian (dimodifikasi dari PSDG, 2014)

Struktur-struktur berupa sesar yang berkembang di daerah penyelidikan berupa struktur dextral berarah baratlaut-tenggara, struktur sinistral berarah baratdaya-timurlaut, dan struktur obliq berarah baratdaya-timurlaut. Diagram Rosset analisis struktur geologi diperlihatkan pada Gambar 4 (Suharmanto, 2015).

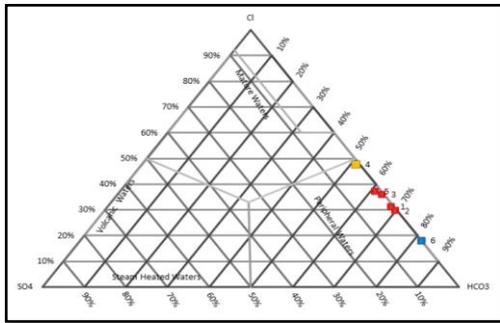


Gambar 4. Diagram Rosset Analisis Struktur Geologi Dominan (PSDG, 2011)

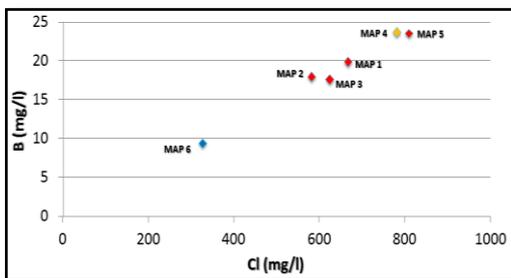
Analisis Tipe Fluida Mata Air Panas

Hasil analisis geokimia memperlihatkan mata air panas daerah ‘P’ umumnya termasuk ke dalam tipe air klorida-bikarbonat. Seluruh mata air panas berada pada zona *Pheripheral Water* menunjukkan kaya akan kandungan HCO₃, hanya MAP 4 dan kemudian disusul oleh MAP 5 yang berada pada zona perbatasan menuju antara *Mature Water* dengan *Pheripheral Water*. Indikasi di lapangan juga menunjukkan bahwa pada mata air panas tersebut dijumpai

adanya sinter karbonat. Diduga penyebab sebagian besar fluida mata air panas bertipe *bicarbonate water* adalah karena fluida mata air panas berinteraksi dengan formasi batugamping dalam perjalanan menuju ke permukaan sehingga terjadi pencampuran dan pengkayaan kandungan HCO_3 . MAP 4 dan 5 diperkirakan bersumber langsung dari reservoir serta hanya sedikit terpengaruh interaksi dengan formasi batugamping, hal ini diperkuat dengan hasil plot grafik kandungan Boron-Klorida. (Gambar 5 Segitiga Ternary Cl-SO₄-HCO₃)



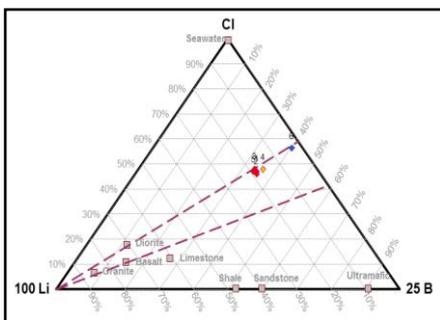
Gambar 5. Analisis Tipe Fluida MAP (dimodifikasi dari PSDG, 2014)



Gambar 6. Grafik Boron Vs Klorin MAP Daerah Penelitian

Gambar 6. memperlihatkan bahwa titik MAP 5 memiliki kandungan Klorida dan Boron paling tinggi dibandingkan dengan kandungan yang terdapat pada mata air panas lain. Tingginya kandungan Boron dan Klorida tersebut mengindikasikan diduga bahwa MAP 5 bersumber dari reservoir.

Analisis Lingkungan Kemunculan MAP

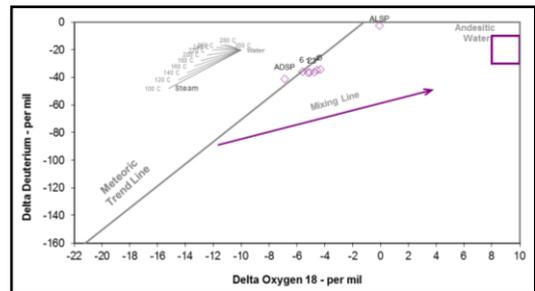


Gambar 7. Analisis Lingkungan Kemunculan MAP Daerah Penelitian (dimodifikasi dari PSDG, 2014)

Hasil pengeplotan dalam diagram segitiga Ternary Cl-Li-B (Gambar 7) kelompok mata air panas 'P' cenderung ke arah

Cl-B yang diduga menunjukkan lingkungan pemunculan mata air panas berada di antara batuan sedimen dan vulkanik namun dari diagram segitiga Ternary Cl-Li-B menunjukkan ada kemungkinan pengaruh bekas aktivitas magmatik pada pemunculan air panas daerah 'P'.

Analisis Isotop ¹⁸O dan ²H MAP

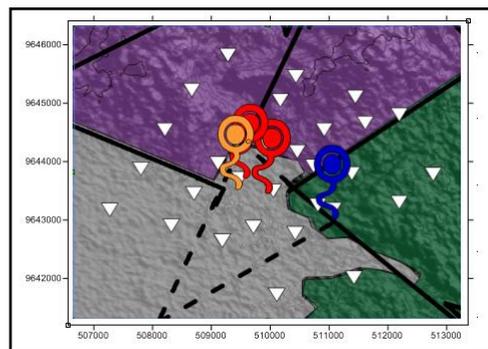


Gambar 8. Analisis Isotop ¹⁸O dan ²H MAP Daerah Penelitian (dimodifikasi dari PSDG, 2011)

Berdasarkan data hasil isotop ¹⁸O dan Deuterium didapatkan hasil pada umumnya cenderung menjauhi garis air meteorik (*Meteoric water Line*) seperti terlihat pada Gambar 8. Hal ini berarti mengindikasikan telah terjadinya pengkayaan ¹⁸O karena adanya interaksi fluida panas dengan batuan di kedalaman. Hal ini mencerminkan bahwa kemungkinan MAP 5, MAP 4, MAP 3, MAP 2, dan MAP 1 berasal langsung dari kedalaman dan kemungkinan pengenceran oleh air meteorik adalah sangat kecil sehingga dapat diduga sebagai zona *Upflow*. Namun MAP 6 berada di garis air meteorik, menunjukkan bahwa MAP 6 sudah terjadi pengenceran oleh air meteorik di permukaan dan mengindikasikan zona minor *Outflow*, hal ini sangat jelas sebab MAP 6 terletak pada pinggir sungai Udang.

Sebagai perbandingan dilakukan pula pengukuran isotop untuk air dingin (ADSP) di daerah 'P' yang diambil dari sungai untuk keperluan sehari-hari dan air laut (ALSP) di daerah 'P'. Terlihat bahwa hasil *plotting* air dingin berada mendekati garis air meteorik dimana mencerminkan air permukaan tidak mengalami reaksi antara batuan dengan air permukaan atau meteorik pada kondisi temperatur yang relatif rendah sedangkan *plotting* dari air laut berada jauh di atas garis meteorik.

METODE MAGNETOTELLURIK

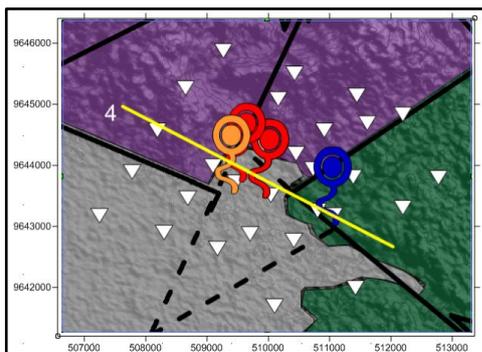


Gambar 9 Distribusi Titik Pengukuran MT Daerah Penelitian (dimodifikasi dari PSDG, 2014)

Pengukuran MT daerah panasbumi 'P' dilakukan sebanyak 30 titik stasiun MT dengan jarak antar titik stasiun ukur berkisar 500–1500 meter. Sebaran titik stasiun ukur melingkupi area pemunculan manifestasi panasbumi dan juga area yang diduga sebagai area prospek sistem panasbumi 'P' berdasarkan analisis survei terdahulu (Survei Terpadu, PSDG 2011) serta di sekitar daerah yang diindikasikan zona *Upflow* dan zona minor *Outflow* berdasarkan hipotesis. Secara umum kualitas data MT yang diperoleh umumnya memiliki kualitas data baik sampai dengan sangat baik. Penilaian ini didasari pada analisis kurva hasil pengukuran, dimana data-data pada frekuensi tinggi hingga rendah tidak menunjukkan adanya undulasi-undulasi (*bump*) yang signifikan. Selama akuisisi data pengukuran, terdapat dua titik yang harus diulangi proses pengukuran karena kualitas yang kurang baik yang bisa disebabkan lingkungan sekitar maupun *human error* saat pengukuran. Gambar 9 memperlihatkan sebaran titik pengukuran MT yang telah dilakukan.

Hasil Inversi Multi Dimensi Lintasan MT

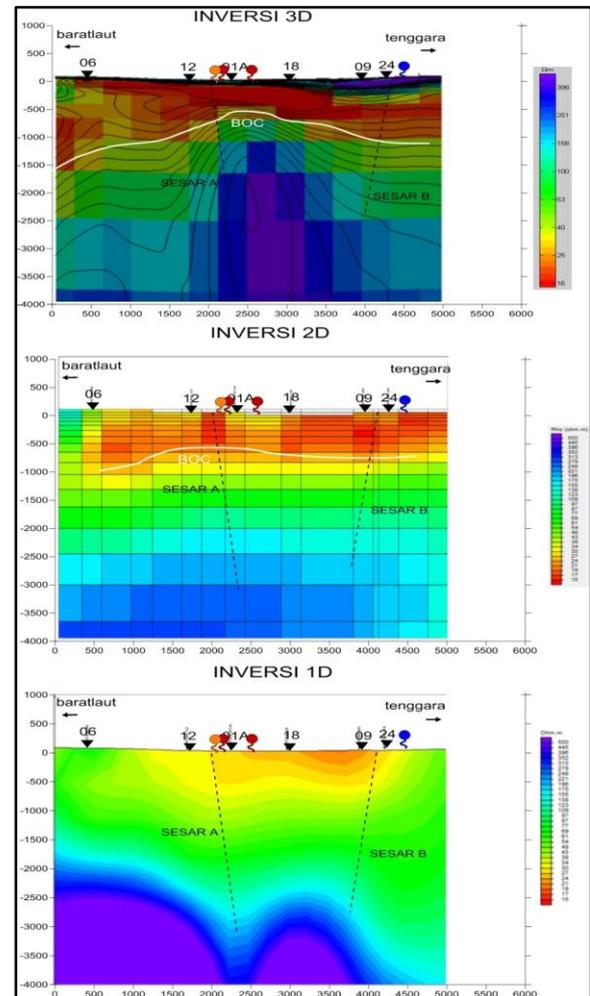
Lintasan MT terdiri dari 6 titik yang berarah baratlaut-tenggara, yaitu MTP-06, MTP-12, MTP-01A, MTP-18, MTP-09, dan MTP-24 (Gambar 10). Berdasarkan data geologi pada Lintasan MT terdapat empat sesar yang memotong lintasan ini, 2 sesar berarah baratdaya-timurlaut berada di titik MTP-12 dan di titik MTP-09. Kemudian dua sesar berarah baratlaut-tenggara selaras dengan arah lintasan. Lintasan MT memotong litologi batuan metamorf malihan sekis di sebelah baratlaut, perbatasan litologi, litologi batuan sedimen endapan aluvium di tengah lintasan, dan batuan sedimen konglomerat di sebelah tenggara.



Gambar 10. Lokasi Lintasan MT

Gambar 11 merupakan hasil dari pemodelan inversi multi dimensi. Zona reservoir ($>30 \Omega\text{m}$) pada lintasan ini diduga tersebar di bagian timurlaut dan ke arah baratdaya, pada hasil inversi 3D pengaruh struktur sesar yang memotong dan selaras dengan lintasan ini sangat terlihat serta sebaran zona reservoir terdapat di kedalaman ± 500 m s.d. batas atas batuan sumber panas yang berbentuk seperti *dome* dengan batas atas ± 1000 m. Pada hasil inversi 2D tergambar pengaruh struktur sesar namun masih bias, sebaran zona ini terdapat di kedalaman ± 400 m s.d. batas atas batuan sumber panas berbentuk seperti *dome* yang memanjang dari baratdaya hingga timurlaut di kedalaman ± 1700 m sedangkan pada hasil inversi 1D tergambar pengaruh struktur sesar namun masih kasar, sebaran zona ini terdapat di kedalaman ± 200 m s.d. batas atas batuan sumber panas berbentuk seperti *dome* *tergraben* di baratdaya dan sedikit di timurlaut pada kedalaman ± 1800 m. Lapisan batuan resistivitas ($>30 \Omega\text{m}$) ini kemungkinan masih merupakan

respon dari batuan malihan menyusun area perbukitan menuju mendasari area pedataran. Nilai resistivitas batuan malihan ini semakin naik seiring dengan naiknya kedalaman yang mengindikasikan batuan yang lebih segar dan masif.



Gambar 11. Hasil Inversi Multi Dimensi Lintasan MT

Batuan aluvium mengisi permukaan bagian tengah dengan nilai resistivitas ($<15 \Omega\text{m}$) yang terdeteksi sampai dengan kedalaman sekitar 500 meter pada hasil inversi 3D. Batas antara batuan aluvium dan malihan ini terindikasi dari kontras nilai resistivitas dan juga sesar geologi berarah baratlaut-tenggara. Diduga zona resistivitas rendah ini sebagai *Clay Cap* yaitu batuan sedimen endapan aluvium, sedimen konglomerat, dan atau batuan metamorf malihan sekis yang sudah teralterasi.

Sebaran zona resistivitas tinggi ($>300 \Omega\text{m}$) dari hasil inversi multi dimensi pada lintasan ini terlihat berbentuk seperti *dome*. Inversi 1D menggambarkan zona resistivitas tinggi yang agak lebih menjulang mengerucut menuju arah baratlaut dan *tergraben* di bawah titik MTP-01A mungkin disebabkan pengaruh struktur sesar sedangkan pada inversi 2D zona resistivitas tinggi memanjang dari baratlaut-tenggara lintasan ini dan berbentuk *dome* dan hasil inversi 2D memiliki kemiripan pada hasil inversi 3D yang berbentuk lebih memuncak *updome* namun terdapat perbedaan kedalaman batas atas zona resistivitas tinggi pada hasil masing-masing inversi. Pada inversi 1D batas atas zona resistivitas tinggi pada kedalaman ± 1500 m dan pada inversi 3D batas atas pada kedalaman ± 1000 m serta pada

inversi 2D batas atas terdapat di kedalaman ± 2000 m. Zona resistivitas tinggi ini diduga sebagai batuan sumber panas, jika berdasar pada data geologi maka diduga merupakan batuan malihan sekis yang berasosiasi dengan sisa panas aktivitas plutonik akibat adanya aktivitas *collision* antara kerak pulau Seram dengan kerak Benua Australia yang terjadi pada kala Pliosen Atas.

INTERPRETASI TERPADU DAN KONSEPTUAL MODEL

Untuk memperoleh sebuah kesimpulan mengenai gambaran dari sistem panasbumi di daerah 'P' maka dilakukan interpretasi terpadu terhadap hasil penyelidikan geologi, geokimia dan geofisika pada daerah tersebut. Berdasarkan penyelidikan geokimia, keberadaan manifestasi kelompok mata air panas P di permukaan menunjukkan adanya sistem panasbumi di daerah tersebut yang diperlihatkan dalam bentuk model konseptual 2-D dan 3-D seperti yang terlihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.

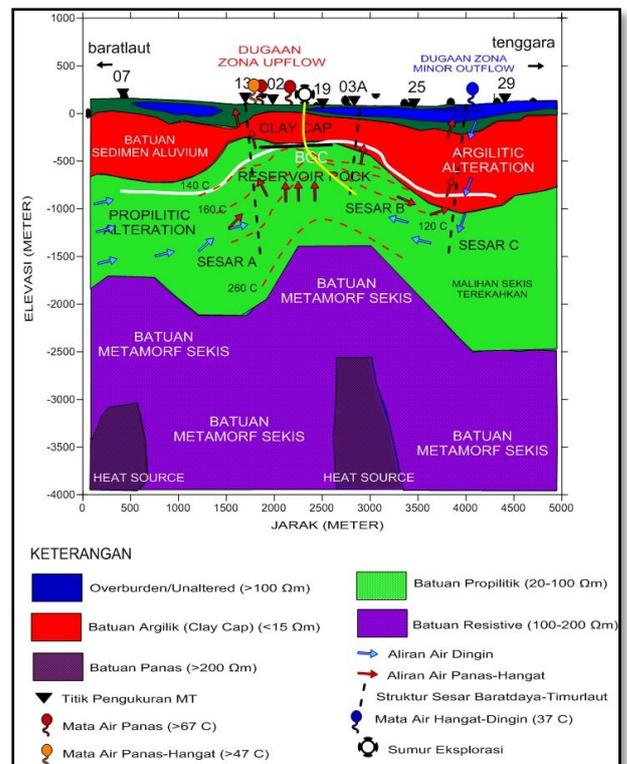
Penampang model panasbumi menggambarkan bentuk dan posisi akumulasi panas di sepanjang struktur rekahan, dengan memotong struktur sesar yang berarah baratdaya-timurlaut. Air meteorik yang masuk, sebagian dapat meresap ke bawah permukaan melalui struktur, rekahan, maupun pori-pori batuan menjadi airtanah dan sebagian lagi teralirkan langsung ke sungai. Kemudian panas dari sisa panas aktivitas plutonik di batuan intrusi dengan airtanah membentuk sistem air panas yang terperangkap pada struktur dan menjadi awal dari suatu reservoir

Dari data magnetotelurik dapat diketahui sumber panas berupa batuan intrusi beraktivitas plutonik berada di bawah MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5 dengan arah membuka dari utara ke tenggara. Mengacu pada hasil inversi 3-D yang diintegrasikan dengan data geologi dan geokimia di daerah panasbumi 'P' dan gabungan dari data pendukung, diperoleh suatu model konseptual. Dari konseptual tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut. Terdapat keberadaan reservoir yang melingkupi berbentuk *dome* saling berhubungan berhubungan, dengan adanya kemenerusan dari *Clay Cap* maupun dari *heat source*. Reservoir berada di bawah kompleks MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5 yang memiliki nilai resistivitas 20-100 Ω m pada kedalaman ± 500 -1500 m, dengan batas atas merupakan *BOC Clay Cap* dan batas bawah merupakan *heat source*. Lalu terdapat struktur yang diduga sebagai jalur aliran panas ke permukaan yang ditandai dengan munculnya mata air panas di permukaan. Dugaan temperatur reservoir dari data geokimia adalah 160-180°C sehingga zona reservoir sistem panasbumi daerah 'P' ini secara klasifikasi sistem panasbumi berdasarkan temperatur dikategorikan ke dalam *Moderate Temperature Geothermal System* dan berdasarkan sejarah geologi dan hasil pemodelan inversi multi dimensi data magnetotelurik dapat dikategorikan daerah panasbumi 'P' termasuk dalam sistem panasbumi jenis tektonik zona kolisi lempeng lempeng (*Heat Sweep Plate Collision*), non-vulkanik.

Dalam menentukan zona *Upflow* sistem panasbumi non vulkanik dapat menggunakan Diagram 10K/Na vs 10Mg/Ca dimana evolusi dari mata air di zona *Upflow* ke zona *Outflow* dicirikan oleh penurunan temperatur. (Tari, 2013) Hal ini sesuai dengan karakteristik yang terdapat pada daerah 'P' sedangkan pada diagram K-Na-Mg, zona ini dicirikan oleh plot mata air yang berada pada *full equilibrium-partial equilibrium* sehingga dapat disimpulkan

diduga zona *Upflow* pada sistem panasbumi daerah 'P' ini berada di antara MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5.

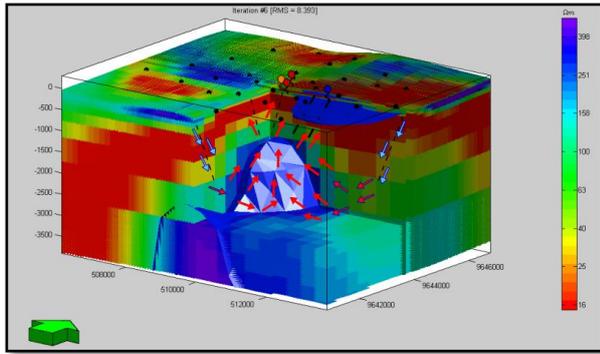
Zona *Outflow* fluida akan memiliki tipe air klorida-bikarbonat atau bikarbonat dengan kondisi *immature equilibrium*, temperatur serta debit yang rendah. Semakin menjauh dari zona *Upflow* maka tipe air berubah menjadi klorida-bikarbonat atau bikarbonat dengan kondisi fluida *partial equilibrium* menuju *immature equilibrium*. Temperatur dan debit bervariasi namun umumnya lebih rendah dari temperatur dan debit pada zona *Upflow* dan terkadang masih dijumpai endapan sinter sehingga dapat disimpulkan diduga zona *Outflow* pada sistem panasbumi daerah 'P' ini berada pada MAP 6 dekat dengan titik MTP-24.



Gambar 13. Model Konseptual Daerah Penelitian Berdasar Hasil Inversi 3D Lintasan 3 Beserta Rekomendasi Sumur Eksplorasi

Struktur geologi yang berkembang di kompleks daerah panasbumi 'P' memiliki kesesuaian dengan hasil penyelidikan geokimia di daerah tersebut. Kelurusan manifestasi di permukaan sesuai dengan sesar-sesar yang berkembang, diduga sebagai jalur bagi fluida dari reservoir naik dan muncul ke permukaan dalam bentuk manifestasi air panas. Sesar baratdaya-timurlaut dan baratlaut-tenggara diduga mengontrol munculnya manifestasi air panas.

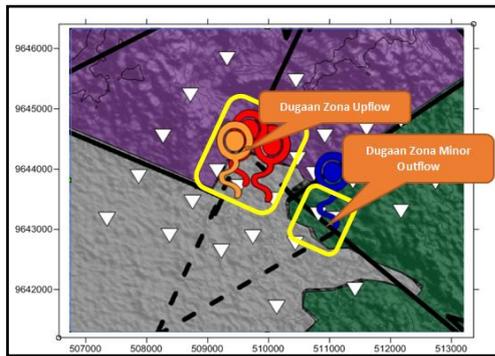
Dari gambaran struktur resistivitas tersebut juga teridentifikasi struktur *updome* di bawah antara MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5. Keberadaan struktur *updome* tersebut terlihat jelas pada hasil inversi Lintasan MT arah baratdaya-tenggara. Hasil inversi lintasan tersebut menunjukkan adanya struktur berbentuk *updome* yang membuka ke arah manifestasi permukaan mata air panas kemudian menerus ke arah utara dan melidih ke arah tenggara. Hal ini sesuai dengan hasil penyelidikan geokimia yang mengindikasikan bahwa zona *Upflow* berada di antara MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5.



Gambar 14 Model Konseptual Daerah Penelitian Berdasar Hasil Inversi 3D Bentuk Kubik

Delineasi Zona Prospek Daerah Penelitian

Zona prospek daerah panasbumi ‘P’ diperoleh dari kompilasi geosains hasil survei MT, geologi dan geokimia (Survei Terpadu, PSDG 2011 dan 2014). Hasil MT menunjukkan daerah prospek berada di sekitar pemunculan air panas daerah panasbumi ‘P’, MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5 (Gambar 15). Area ini diindikasikan dengan nilai resistivitas rendah dan analisis liniasi kontur sebagai indikasi lapisan batuan yang mengalami alterasi dan sesar yang berkembang. Struktur sesar geologi juga berperan dalam menzonasi prospek panasbumi. Sesar berarah baratdaya-timurlaut diperkirakan menjadi batas zona prospek bagian barat dan timur. Kemudian sesar berarah baratlaut-tenggara pembatas zona prospek selatan. Berdasarkan kompilasi data-data di atas, maka perkiraan daerah prospek panasbumi ‘P’ memiliki luas area sekitar 3 km².



Gambar 15. Delineasi Zona Prospek Daerah Penelitian

KESIMPULAN

Setelah melakukan pengolahan data dan pemodelan inversi multi dimensi sistem panasbumi pada daerah penelitian dengan metode magnetotelurik dan diintegrasikan oleh data geologi dan geokimia, dapat disimpulkan:

- Sistem panasbumi daerah ‘P’ terbentuk akibat dari terjadinya benturan antara kerak Pulau Seram dengan kerak Benua Australia (*plate collision*) yang menyebabkan naiknya magma pada zona lemah, sehingga dapat dikategorikan daerah panasbumi ‘P’ termasuk dalam sistem panasbumi jenis tektonik

zona kolisi lempeng (*Heat Sweep Plate Collision*) yang berasosiasi dengan pembentukan batuan intrusi, non-vulkanik.

- Hasil inversi 3D Data MT memperlihatkan:
 - Lapisan konduktif (<15 Ωm) dengan ketebalan ± 1000 m di sebelah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut kemudian mengalami penipisan hingga ketebalannya menjadi ± 500 m di bawah area kemunculan mata air panas, diindikasikan sebagai *Clay Cap* dari sistem panasbumi.
 - Lapisan yang berada di bawah *Clay Cap* dengan nilai resistivitas sedikit lebih tinggi (>30 Ωm), diindikasikan sebagai zona reservoir, dengan ketebalan ± 1000-2000 m di sebelah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut kemudian mengalami penipisan hingga ketebalannya menjadi ± 500-1500 m di bawah area kemunculan mata air panas. Keberadaan pusat zona reservoir terdapat di bawah area kemunculan manifestasi air panas.
 - Lapisan dengan nilai resistivitas tinggi (>300 Ωm) dan berbentuk updome, berada di bawah area kemunculan mata air panas (MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5) mengindikasikan *heat source*. Keberadaan *heat source* sistem panasbumi daerah penelitian diketahui berada di utara kemudian melidih membesar ke arah tenggara membentuk *updome*.
- Zona *Upflow* berada di bawah area kemunculan mata air panas (MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5).
- Zona minor *Outflow* dari sistem mengarah ke barat dan tenggara dari MAP1, MAP2, MAP4, dan MAP5 yaitu MAP6 dekat titik MTP-24.
- Temperatur bawah permukaan diperkirakan sekitar 160-180°C termasuk *Moderate Temperature Geothermal System*.
- Lokasi area prospek di daerah penyelidikan berada di sekitar pemunculan manifestasi permukaan mata air panas (MAP 1, MAP 2, MAP 4, dan MAP 5) dengan luas sekitar 3 km²

UCAPAN TERIMAKASIH

Kepada Kelompok Penyelidikan (KP) Panasbumi Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) RI yang telah mengizinkan dan memfasilitasi menggunakan Data Pengukuran MT Daerah ‘P’ pada penelitian ini, PT. NewQuest Geotechnology yang telah memfasilitasi pengolahan data serta analisis interpretasi, dan DIKTI Kementerian Ristek-Dikti RI yang telah mendanai penulis menyelesaikan studi Program Magister Eksplorasi Geothermal Universitas Indonesia melalui skema Beasiswa Program Pascasarjana Dalam Negeri Calon Dosen (BPPDN Cal-Dos) tahun 2013.

DAFTAR ACUAN

- Amriyah, Q. (2012). *Pemodelan Data Magnetotelurik Multidimensi untuk Mendelineasi Sistem Geothermal Daerah Tawau, Malaysia*. Depok: Universitas Indonesia
- Cumming, W. dan Mackie, R. (2010). *Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History*. Proceeding World Geothermal Congress 2010.

- Daud, Y. (2013). *Metode Magnetotelurik (MT)*, Jakarta: Universitas Indonesia
- Fahmi, F. (2013). *Pemodelan Sistem Geothermal Arjuno-Welirang Dengan Menggunakan Data Magnetotellurik*. Depok: Universitas Indonesia
- Heditama, et al. (2012). *3-D Inversion of MT Data Using MT3Dinv-X Software*, Proceeding The 12th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference, Bandung
- Powell, T., dan Cumming, W. (2010) *Spreadsheet for Geothermal Water and Gas Geochemistry*, Proceeding Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, California, hal. 1-10.
- Pusat Sumber Daya Geologi, (2011), *Survei Geofisika Terpadu Gayaberat, Geomagnet, dan Geolistrik daerah Panas Bumi Banda Baru*, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G. L., Yongmiwon, dan Uyeshima, M. (2003). *Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: Data Space Method*. Physics of The Earth and Planetary Interiors 150 (2005) 3-14.
- Suharmanto, P. (2015). *Delineasi Zona Prospek Sistem Panasbumi Daerah 'P' Menggunakan Pemodelan Data Magnetotelurik Terintegrasi Data Geologi dan Geokimia*, Jakarta: Universitas Indonesia
- Tari, Prameswarie, N. (2013). *Karakteristik Geokimia Mata Air Termal pada Sistem Panas Bumi Non Vulkanik Di Sulawesi dan Implikasinya pada Konsep Eksplorasi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Tim Survei Terpadu. (2014). *Pusat Sumber Daya Geologi: Penyelidikan Terpadu Magnetotelurik Daerah Panasbumi "P"*. Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku
- Tjokrosoetro, S. (1993). *Geologi Lembar Masohi, Maluku, skala 1 : 250.000*.