

Delineasi Model Tentatif Sistem Geothermal dan Interpretasi Komprehensif Berdasarkan Analisis Geofisika, Geokimia dan Geologi

Makhrani*

*)Program Studi Geofisika Jurusan Fisika FMIPA Universitas Hasanuddin
e-mail : rani_anshar@yahoo.co.id

ABSTRAK

Telah didelineasi model tentatif sistem geothermal berdasarkan interpretasi komprehensif dari analisis geofisika, geokimia dan geologi yang dapat memperlihatkan lebih jauh tentang sistem geothermal di daerah penelitian. Analisis geofisika dilakukan untuk zonasi bawah permukaan (overburden, claycap dan reservoir) dan penentuan fasa fluida reservoir. Pola aliran hidrotermal bawah permukaan ditentukan dari analisis geofisika dan geokimia, didukung oleh analisis geologi. Dari analisis dan interpretasi komprehensif diperoleh model tentatif sistem geothermal daerah penelitian, dimana diketahui bahwa pola aliran hidrotermal bergerak dari zona *up-flow* di daerah penelitian (zona dengan tipe air SO_4) mengarah pada aliran *outflow* ke daerah "WNS" dan "ARP" (zona dengan tipe air HCO_3 dan Cl) yang jauhnya ± 1400 meter. Pada daerah penelitian bagian Utara dan Timur terdapat lapisan reservoir (resistivitas 20-75 Ωm) dengan kedalaman ≤ 1350 m di bawah permukaan. Di atas lapisan reservoir terdapat lapisan *claycap* (resistivitas $\leq 10 \Omega m$) dan zona overburden (resistivitas antara 10 – 20 Ωm). Fasa fluida yang mendominasi sistem reservoir geothermal daerah penelitian adalah fasa cair dengan kapasitas $> 90\%$, dengan temperatur reservoir termasuk dalam kategori suhu tinggi yaitu > 225 °C.

Kata Kunci : model tentatif, sistem geothermal, reservoir geothermal.

1. PENDAHULUAN

Daerah penelitian merupakan salah satu daerah prospek geothermal di Indonesia yang berlokasi di Pulau Sumatera. Merujuk pada matriks klasifikasi energi panas bumi yang dikeluarkan oleh Badan Standarisasi Nasional (SNI 13-5012-1998), penyelidikan rinci dilakukan berdasarkan rekomendasi dari penyelidikan sebelumnya (penyelidikan pendahuluan dan penyelidikan pendahuluan lanjutan) yang lebih dititik beratkan pada penyelidikan ilmu kebumihan terpadu (geofisika, geokimia dan geologi) dan dilengkapi pengeboran landaian suhu. Penerapan dari multi disiplin ilmu kebumihan tersebut diharapkan mampu memberikan model tentatif sistem geothermal yang dapat menginterpretasikan kondisi bawah permukaan bumi. Model tentatif sistem geothermal sangat diperlukan untuk mengenal lebih jauh tentang sistem geothermal, sebagai salah satu penyokong dalam membuat keputusan eksploitasi geothermal. Sebelum mendapatkan model tentatif tersebut, dilakukan delineasi sistem geothermal dengan menganalisis data geofisika dan data geokimia serta menggabungkannya dengan data geologi. Hal inilah yang melatar belakangi penelitian ini.

Analisis geofisika mencakup analisis struktur resistivitas dan analisis tekanan-

temperatur sumur eksplorasi. Untuk mempermudah proses analisis geofisika maka digunakan model 3D hasil pengikatan data sekunder geofisika dengan aplikasi software Petrel 2008 dan software pendukung (Global Mapper 13). Analisis geokimia mencakup analisis tipe air permukaan untuk menentukan aliran *upflow*/aliran vertikal (tipe air SO_4) dan *outflow*/aliran lateral (tipe air HCO_3 dan Cl). Analisis geologi dilakukan untuk mendukung proses analisis geofisika dan geokimia. Hasil dari proses analisis geofisika, geokimia dan geologi, selanjutnya didelineasi dan diinterpretasi secara komprehensif.

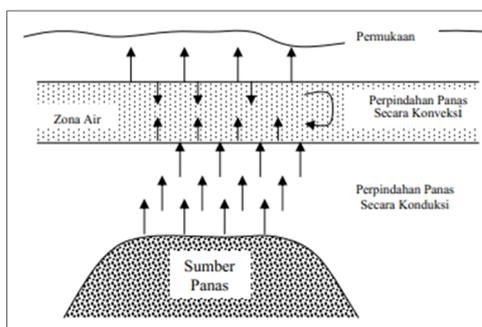
Adapun tujuan dari deliniasi sistem geothermal dan interpretasi secara komprehensif adalah untuk menentukan zonasi bawah permukaan wilayah prospek geothermal berdasarkan nilai resistivitas yang dicerminkan oleh data 3D-MT, menentukan pola aliran hidrotermal berdasarkan karakteristik sifat kimia air permukaan yang dicerminkan oleh data sekunder geokimia, menentukan nilai temperatur bawah permukaan yang dicerminkan oleh data PT, menentukan jenis fluida berdasarkan parameter kurva BPD, serta menentukan kategori temperatur reservoir geothermal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Geothermal

Energi geothermal (panas bumi) merupakan energi yang berasal dari dalam bumi yang bersifat ramah lingkungan, terbarukan, serta dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Dari sudut pandang geologi, sumber energy panas bumi berasal dari magma yang berada di dalam bumi (Suparno, 2009). Pasokan energi geothermal tidak bergantung pada musim seperti halnya energi matahari dan angin, serta tidak ditentukan oleh pasaran energi dunia seperti energi fosil. Teknologi pemanfaatan geothermal relatif sederhana dan aman. Menurut Badan Energi Internasional (IEA, 2007), defenisi geothermal adalah suatu energi panas yang dipancarkan dari dalam kerak bumi, biasanya berupa air panas atau uap panas. Energi ini dimanfaatkan di lokasi yang cocok untuk pembangkit listrik setelah ditransformasi atau dimanfaatkan langsung sebagai panas. Keberadaannya sebagai energi *indigeneous* (pribumi) atau energi yang hanya dapat digunakan pada wilayah geothermal itu sendiri.

Transfer panas pada sistem geothermal terjadi dalam dua mekanisme yaitu perpindahan panas secara konduksi dan secara konveksi. Honstein (1992) membagi menjadi sistem konveksi dan nonkonveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas (Saptadji, 2002). Air yang terpanaskan oleh sumber panas memiliki densitas yang lebih ringan dibanding air yang lebih dingin. Oleh karena itu, air yang panas memiliki kecenderungan untuk bergerak ke atas (Gambar 1). Sementara air yang lebih dingin memiliki densitas yang lebih berat, memiliki kecenderungan untuk bergerak ke bawah akibat pengaruh gaya gravitasi. Mekanisme yang dikenal sebagai arus konveksi ini menyebabkan terbentuknya sirkulasi air yang dapat mentransfer panas (perpindahan panas secara konveksi).

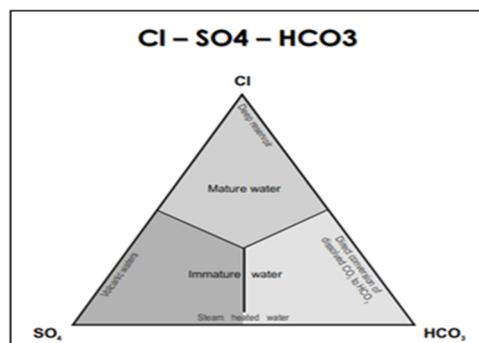


Gambar 1. Ilustrasi perpindahan panas di bawah permukaan

Menurut Bartucz (2009), yang terpenting dari berbagai definisi geothermal adalah bahwa energi geothermal lebih bergantung pada fluida yang ada dan suhu panas bebatuan yang dapat menyebar. Di beberapa daerah dekat permukaan bumi, orang dapat menemukan suhu yang tepat, tetapi tidak dieksploitasi karena tidak adanya cairan pembawa. Suhu di kerak bumi meningkat seiring dengan kedalaman dengan suhu rata-rata 30° C/km, namun untuk membawa panas ini ke dekat permukaan pada kedalaman (mencapai 3000 m hingga 4000 m pada kasus yang ekstrim), dibutuhkan cairan untuk mengedarkan dan mentransfer panas dari bebatuan.

2.2 Geoindikator Sifat Kimia Sistem Geothermal

Dalam bukunya yang berjudul *Chemical Behaviour of Common Species*, Nicholson (1993) mengemukakan berbagai parameter dalam menginterpretasikan sifat kimia air. Salah satu dari parameter tersebut adalah persentasi antara kandungan Cl, SO₄ dan HCO₃. Parameter persentasi kandungan Cl, SO₄ dan HCO₃ digunakan untuk menentukan jenis dan asal fluida geothermal. Gambar 2 menampilkan model diagram trilinear perbandingan antara kandungan Cl, SO₄ dan HCO₃.



Gambar 2 Diagram trilinear perbandingan Cl, SO₄ dan HCO₃

2.3 Metode Magnetotellurik

Disiplin ilmu Geofisika sering kali mengacu pada penerapan dan aplikasi metode-metode geofisika. Metode geofisika digunakan untuk memetakan zona bawah permukaan bumi berdasarkan nilai hasil pengukuran yang merupakan respon fisik bumi. Salah satu metode geofisika yang sering digunakan dalam eksplorasi geothermal adalah metode megnetotellurik (MT).

Metode magnetotellurik adalah metode elektromagnetik pasif yang mampu mencerminkan respon fisik bumi terhadap nilai

resistivitas di bawah permukaan. Metode ini melibatkan hubungan antara medan magnet dengan medan listrik yang merambat di permukaan sebagai akibat dari interaksi yang terjadi antara *solar wind* (angin matahari) dengan magnetosfer bumi. Akibat interaksi tersebut, timbul medan elektromagnetik yang merambat di permukaan dan dapat diinvestigasi untuk mendapatkan nilai resistivitas batuan di bawah permukaan bumi.

Medan elektromagnetik disebabkan oleh matahari, inilah yang merupakan sumber medan untuk metode magnetotellurik. Di permukaan matahari, selalu terjadi letupan-letupan yang menghasilkan partikel hidrogen. Karena terjadi proses ionisasi di permukaan matahari, maka hidrogen berubah menjadi plasma atau lebih dikenal sebagai angin matahari (*solar wind*) yang mengandung proton dan elektron. Kecepatan *solar wind* ini relatif rendah dan memiliki sifat acak dan berubah terhadap waktu.

Proses pemisahan proton dan elektron yang menciptakan arus listrik diterangkan oleh Hukum Gauss. Hukum tersebut menerangkan bahwa muatan listrik dapat menciptakan dan mengubah medan listrik yang cenderung bergerak dari muatan positif ke muatan negatif, dengan perumusan :

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \tag{1}$$

dengan :

\vec{D} = Medan pergeseran listrik (C/m²)
 ρ_f = Rapat muatan bebas/densitas muatan listrik (C/m³)

Adapun pembentukan medan magnetik yang timbul dari interaksi antara *solar wind* dengan magnetopause yang terjadi pada waktu tertentu, dinyatakan dalam Hukum Ampere bahwa rapat arus bebas dan medan pergerakan listrik pada waktu tertentu akan menciptakan medan magnetik.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2}$$

dengan :

\vec{H} = Medan magnetik (A/m)
 \vec{j}_f = Rapat arus bebas/rapat arus listrik (A/m²)

Selanjutnya, *solar wind* yang membawa EM akan terus menjalar sampai ionosfer dan berinteraksi lagi dengan lapisan tersebut. Sekali lagi, terjadi medan atau gelombang EM dan arus tellurik yang mengalir dalam ionosfer tersebut.

Gelombang EM tersebut akan menjalar sampai ke permukaan bumi dan sesuai sifat pembawaannya yaitu berfluktuasi terhadap waktu. Bila medan ini merupakan sumber

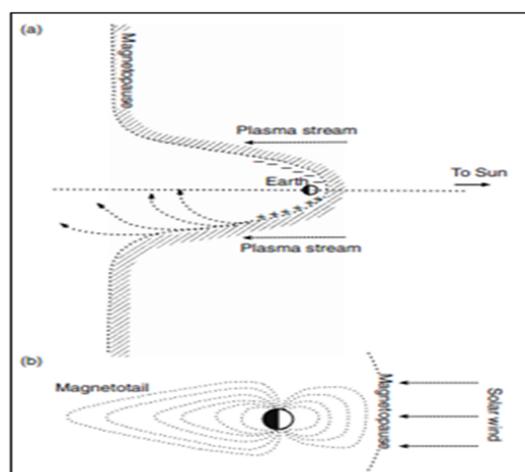
medan magnet di permukaan bumi dan menembus bumi, maka akan terjadi interaksi antara medan EM dan material bumi yang dapat bersifat sebagai konduktor. Akibat interaksi ini, akan timbul arus induksi dengan konsep :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3}$$

dengan :

\vec{B} = Induksi magnetik (Wb/m²)
 \vec{E} = Medan listrik (V/m)

Arus induksi ini, akan menginduksi ke permukaan bumi yang dikenal sebagai arus tellurik. Arus tellurik inilah yang akan menjadi sumber medan listrik di permukaan bumi untuk metoda MT (Nurwianti, 2010).



Gambar 3 (a) Distorsi mendorong medan magnet bumi. *Solar wind* terus berhembus dengan intensitas yang berbeda. Peningkatan tekanan solar wind mendorong magnetopause mendekati Bumi sehingga menimbulkan badai magnetik. (b) garis-garis medan magnet menunjukkan bentuk magnetosfer bumi.

Secara singkat, *solar wind* memancarkan proton dan elektron dari matahari secara kontinu. Ketika bertemu dengan medan magnet bumi (magnetopause), proton dan elektron dibelokkan dalam arah yang berlawanan, sehingga membentuk sebuah medan listrik (Gambar 3). Interaksi antara *solar wind*, magnetosfer bumi, dan ionosfer menghasilkan fluktuasi elektromagnetik dengan frekuensi <1 Hz (waktu yang lebih lama dari 1 s) (Simpson dan Bahr, 2005).

Metode magnetotellurik (MT) adalah metode elektromagnetik pasif. Metode ini melibatkan pengukuran fluktuasi listrik di alam (E) dan magnetik (B) dalam arah ortogonal bidang permukaan bumi sebagai sarana untuk menentukan konduktivitas struktur bumi pada kedalaman mulai dari puluhan hingga ratusan kilometer. Respon elektromagnetik dari setiap

kedalaman dapat diperoleh dengan memperpanjang perioda *sounding*. Prinsip ini diwujudkan dalam hubungan antara elektromagnetik dan penetrasi kedalaman (*skindepth*) yang menggambarkan peluruhan eksponensial medan elektromagnetik yang berdifusi ke dalam media.

$$\rho(T) = (T/\pi\mu\bar{\sigma})^{1/2} \quad (4)$$

dimana :

ρ = Penetrasi kedalaman (km)

T = Periode (s)

μ = Permeabilitas magnetik (Hm^{-1})

$\bar{\sigma}$ = Konduktivitas rata-rata medium penetrasi (Sm^{-1})

Seiring bertambahnya kedalaman, terjadi peluruhan eksponensial dari medan elektromagnetik, hal ini menyebabkan medan EM tidak sensitif terhadap konduktivitas struktur yang lebih dari $\rho(T)$. Oleh karena itu, dalam studi kebumihan, μ biasanya diberikan nilai ruang bebas ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$). Dengan demikian, maka persamaan (4) dapat diperkirakan sebagai :

$$\rho(T) \approx 500 \sqrt{T\rho_a} \quad (5)$$

Dimana:

ρ_a = *Apparent resistivitas* (Ωm)

Medan elektromagnetik yang secara alami terinduksi ke bumi dan dieksploitasi dalam penerapan metode MT memiliki periode gelombang $\sim 10^{-3}$ - $\sim 10^5$ s. Rentang kedalaman yang luas yang dapat dicitrakan MT merupakan salah satu keuntungan MT. Informasi mengenai konduktivitas listrik bawah permukaan pada skala kerak atau pada kedalaman yang lebih dalam dapat diperoleh dengan penerapan metode MT (magnetotelurik).

3. METODOLOGI

Untuk mendapatkan model tentatif sistem geothermal, dalam penelitian ini digunakan beberapa data sekunder yaitu data sekunder geofisika (data 3D-MT dan data PT [*Pressure-Temperature*]), data sekunder geokimia (kandungan kimia air panas) dan data sekunder geologi rinci (informasi mengenai kondisi struktur dan stratigrafi, morfologi serta manifestasi geothermal daerah penelitian), data tersebut kemudian dianalisis.

Digunakan parameter nilai resistivitas $\leq 10 \Omega m$ untuk penentuan lapisan *claycap* dan 20-75 Ωm untuk penentuan lapisan reservoir. Untuk mempermudah proses analisis geofisika maka digunakan model 3D hasil pengikatan data sekunder geofisika dengan aplikasi software

Petrel 2008 dan software pendukung (Global Mapper 13). Model 3D data PT digunakan untuk penarikan kontur termal bawah permukaan. Digunakan pula parameter kurva BDP (*Boiling Point with Depth*) untuk menentukan fasa fluida reservoir (fasa cair = $T < T_s$ dan fasa uap = $T > T_s$). Analisis geokimia mencakup analisis tipe air permukaan untuk menentukan aliran *upflow*/aliran vertikal (tipe air SO_4) dan *outflow*/aliran lateral (tipe air HCO_3 dan Cl).

Untuk mencapai tujuan dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan yang harus dilaksanakan. Tahapan-tahapan tersebut merupakan tahapan yang telah disusun secara sistematis sebagaimana diuraikan berikut ini.

3.1 Tahap Pembuatan Model 3D Berdasarkan Data 3D-MT.

Model 3D dalam penelitian ini sangat berguna untuk mempermudah dalam melakukan analisis terhadap data resistivitas dari daerah penelitian secara menyeluruh. Untuk memperoleh model 3D berdasarkan data sekunder 3D-MT, dilakukan pengikatan koordinat dari data sekunder 3D-MT dengan aplikasi software Petrel 2008 serta software pendukung Global Mapper 13. Tahapan pengikatan data 3D-MT terdiri dari pengikatan koordinat blok Slice, pengikatan koordinat blok Section BD-TL, pengikatan koordinat blok Section BL-TG, pemodelan lapisan substratum top reservoir geothermal dan pengikatan *surface* lokasi penelitian.

3.2 Pembuatan Model 3D Berdasarkan Data PT (*Pressure - Temperature*)

Pembuatan model 3D berdasarkan data sumur (PT) berfungsi untuk mempermudah penarikan kontur termal. Setiap tahapan dalam pembuatan model 3D dilakukan dengan aplikasi software Petrel 2008 pada lembar kerja yang sama dengan lembar kerja pembuatan model 3D berdasarkan data 3D-MT. Hal tersebut dilakukan untuk mempermudah dalam melakukan analisis terhadap nilai resistivitas data 3D-MT dengan data PT (*Pressure - Temperature*).

3.3 Penentuan Pola Aliran Hidrotermal (Analisis Geokimia dan Geologi)

Tahap awal analisis data adalah melakukan pengelompokan tipe air permukaan dengan menggunakan data sekunder geokimia yang merupakan hasil analisa kimia air panas (Masdjuk, 1989). Pengelompokan tipe air permukaan dilakukan berdasarkan parameter perbandingan presentase Cl , HCO_3 dan SO_4 yang dikemukakan oleh Nicholson (1993). Untuk mengetahui perbandingan presentase Cl , HCO_3

dan SO_4 , maka dilakukan plot nilai Cl , HCO_3 dan SO_4 dari titik-titik pengambilan sampel (WNS1, WNS2, WNS3, WNS4, ARP1, ARP3, ARP3, BND1, BND2 dan BND3) ke dalam *software* Geokimia sehingga didapatkan diagram Trilinear perbandingan SO_4 , Cl , dan HCO_3 yang mampu menunjukkan penyebaran tipe air panas di daerah penelitian. Setelah diketahui penyebaran tipe air panas di daerah penelitian, selanjutnya dilakukan analisa untuk mengetahui pola aliran hidrotermal dengan mengkombinasikan data geologi, sehingga *flow zone* (zona aliran) dapat ditentukan.

3.4 Zonasi Bawah Permukaan (Analisis Geofisika dan Geologi)

Setelah model 3D hasil pengikatan data 3D-MT diperoleh, maka dilakukan analisis terhadap struktur resistivitas bawah permukaan untuk zonasi bawah permukaan. Hal utama untuk melakukan zonasi bawah permukaan adalah menentukan zona impermeabel (*clay cap*) dan zona reservoir. Untuk melakukan zonasi tersebut digunakan dua parameter resistivitas. Pertama, lapisan impermeabel/*clay cap* selalu bersifat lebih konduktif dengan harga resistivitas $\leq 10 \Omega m$ yang kontinu. Kedua, zona reservoir berada di bawah lapisan yang bersifat impermeabel dan memiliki harga resistivitas 20-75 Ωm . Proses analisa dilakukan dengan kombinasi data geologi.

3.5 Pembuatan Kurva BPD (*Boiling Point with Depth*)

Kurva BPD dibuat dengan melibatkan informasi kedalaman sumur, nilai temperatur (T) dan tekanan (P) terekam serta harga temperatur saturasi (T_s) dari data 28 sumur eksplorasi yang menyebar dalam 8 kluster. Harga T_s ditentukan dari penyesuaian antara temperatur saturasi dengan nilai P pada kedalaman. Kemudian, T_s diperoleh dengan melakukan interpolasi berdasarkan tabel saturasi oleh Keenan (1969) dalam Herdianita (2008). Tabel tersebut masih digunakan untuk interpretasi fasa fluida geothermal sampai saat ini. Selanjutnya, dengan aplikasi Ms.Excel, kedalaman sumur, nilai T, nilai P dan T_s diplot menjadi kurva BPD yang mampu menunjukkan kondisi T vs T_s terhadap kedalaman secara sederhana.

3.6 Penentuan Fasa Fluida Reservoir Dan Penarikan Kontur Termal (Analisis Geofisika dan Geokimia)

Penentuan fasa fluida reservoir dilakukan dengan analisa terhadap nilai T dan T_s . Syarat yang perlu diketahui dalam penentuan kandungan fluida geothermal adalah bahwa di

daerah bawah permukaan pada kondisi temperatur kurang dari temperatur saturasi, maka kandungan fluida di bawah permukaan merupakan fluida dalam fasa cair ($T < T_s$). Sementara jika kondisi temperatur di daerah bawah permukaan pada kondisi temperatur lebih dari temperatur saturasi, maka kandungan fluida di bawah permukaan merupakan fluida dalam fasa uap ($T > T_s$). Dan jika kondisi temperatur di daerah bawah permukaan pada kondisi temperatur sama dengan temperatur saturasi, maka kandungan fluida di bawah permukaan merupakan fluida dalam fasa uap dan/atau fasa air ($T = T_s$) (Parameter mengacu pada diagram fasa terner).

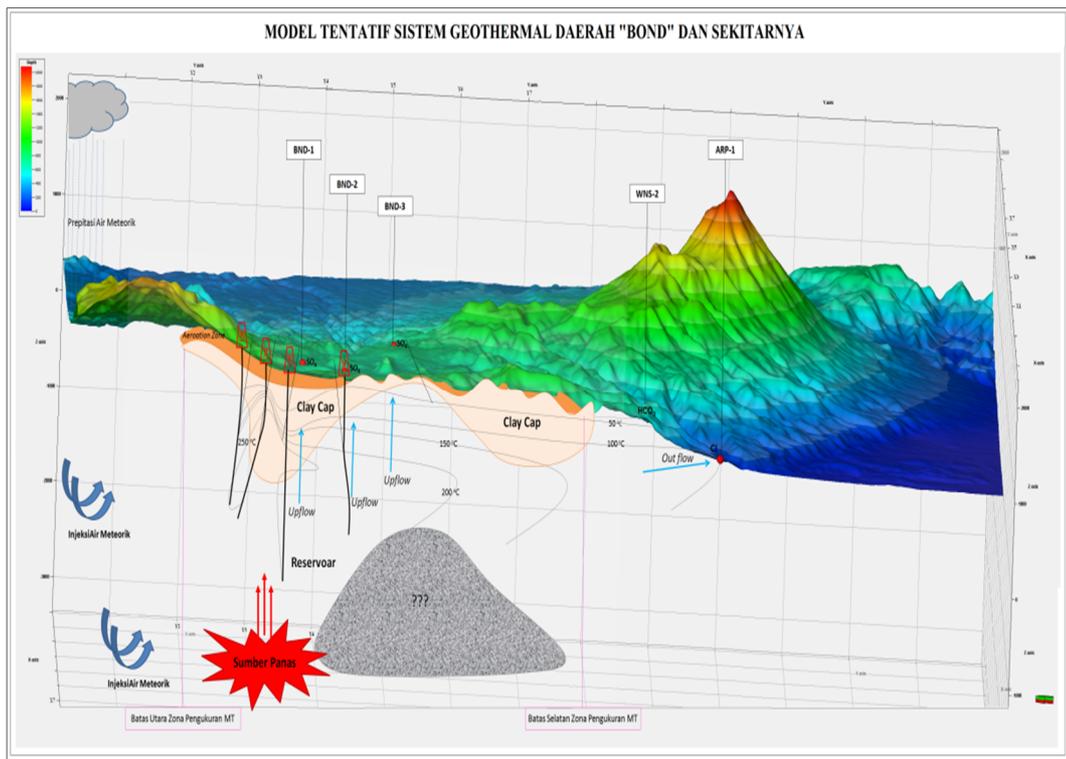
Penarikan kontur termal dilakukan untuk mendelineasi pola aliran hidrotermal bawah permukaan daerah penelitian dan sekitarnya. Penarikan garis kontur termal melalui proses analisa terhadap gradien termal berdasarkan data PT yang disajikan dalam *point well data* (model 3D berdasarkan data PT) pada beberapa sumur (sebagai sumur perwakilan dari 28 sumur) dan disesuaikan dengan kondisi pola aliran hidrotermal.

3.7 Interpretasi komperensif

Setelah melakukan penentuan pola aliran hidrotermal, zonasi bawah permukaan, penarikan kontur termal dan penentuan fasa fluida reservoir, maka informasi-informasi tersebut dapat dikombinasikan dengan melakukan analisis data terpadu (analisis geofisika, geokimia dan geologi) untuk mendelineasi model tentatif sistem geothermal. Selanjutnya dilakukan interpretasi komperensif untuk menginterpretasikan kondisi sistem geothermal daerah penelitian.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendelineasi sistem geothermal lapangan penelitian, dibutuhkan penggambaran secara lateral dari permukaan (*surface*) sampai bawah permukaan (*subsurface*). Untuk mendapatkan penggambaran tersebut dilakukan penyayatan terhadap model 3D lokasi penelitian. Sayatan model lokasi penelitian tersebut dianggap mampu mewakili gambaran daerah penelitian secara keseluruhan. Selanjutnya, model tentatif dapat didelineasi berdasarkan hasil analisis geokimia terhadap manifestasi mata air panas daerah penelitian dari data geokimia, hasil analisis terhadap nilai resistivitas bawah permukaan daerah penelitian dari data 3D-MT dan hasil analisis temperatur dan tekanan daerah penelitian dari data PT sumur-sumur eksplorasi. Model tentatif sistem geothermal daerah penelitian didelineasi seperti Gambar 4.



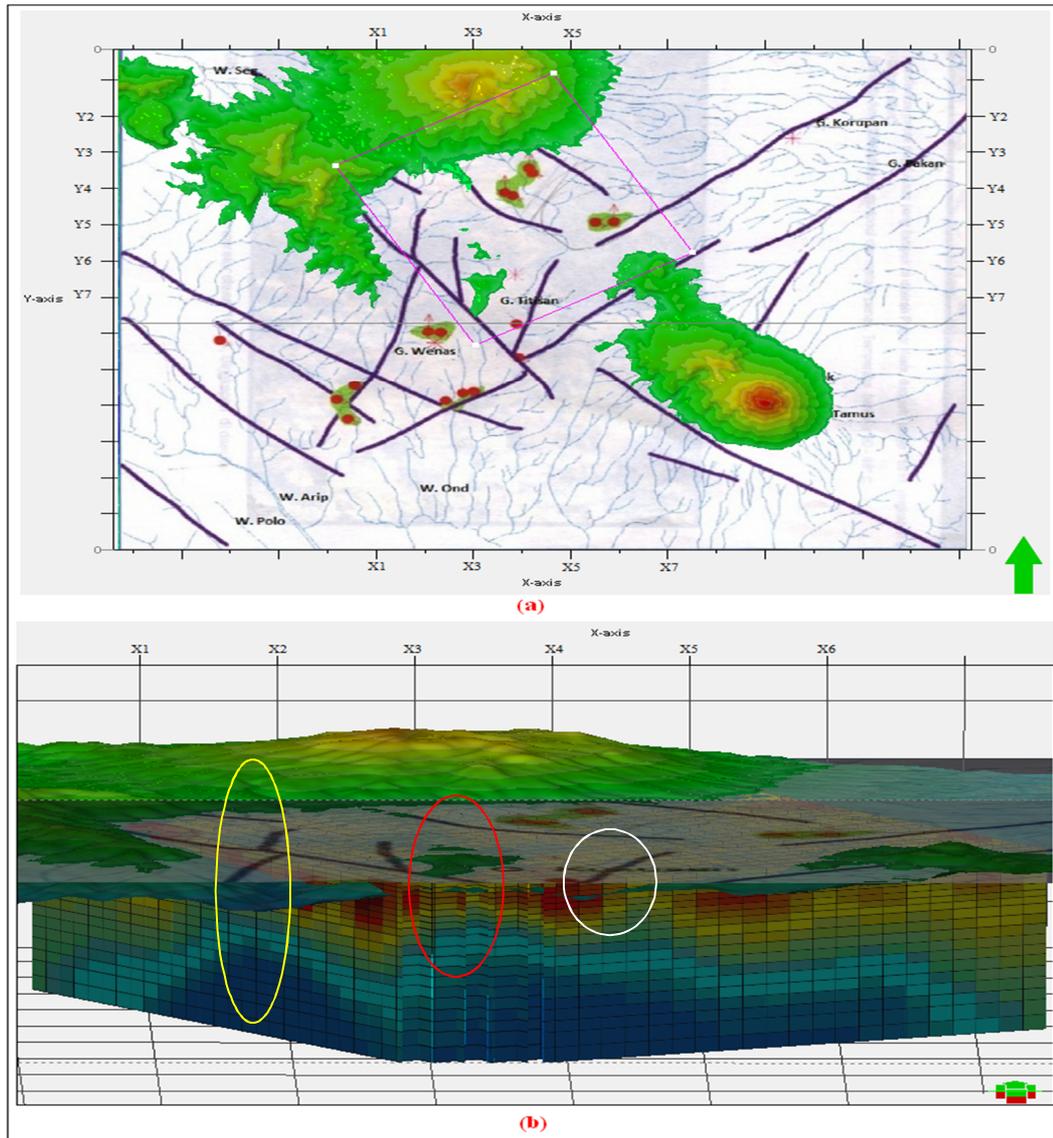
Gambar 4 Model Tentatif Sistem Geothermal Daerah Penelitian :
 Jarak antara koordinat X dan Y (*Longitude dan Latitude*)
 n dengan n+1 sama dengan 2000 m (n = Y atau X)

Daerah Penelitian terletak pada morfologi pendaratan yang diinterpretasikan sebagai kreter tua. Wilayah ini merupakan wilayah dengan akumulasi material vulkanik yang tinggi dari produk gunung api di sekitarnya. Keberadaan manifestasi di daerah penelitian mencirikan adanya zona lemah oleh sesar di sekitar lokasi. Untuk melihat hubungan resistivitas dengan struktur tersebut maka diperlukan sayatan (*intersection*). Letak sayatan ditunjukkan oleh garis horizontal abu-abu pada Gambar 5a dan hasil sayatan diperlihatkan oleh Gambar 5b.

Gambar 5b memperlihatkan bahwa pada lapangan pengukuran MT bagian Selatan terlihat pelonjakan nilai resistivitas ($> 10 \Omega m$) di sekitar sesar ikutan berarah Barat Laut-Tenggara (yang sejajar dengan struktur utama). Hal tersebut diperlihatkan pada gambar yang tandai oleh lingkaran berwarna merah. Selain pada lapangan penelitian bagian Selatan, pada lapangan

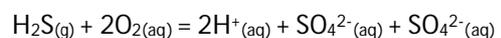
penelitian bagian Barat juga memperlihatkan terjadinya pelonjakan nilai resistivitas ($> 10 \Omega m$) di sekitar sesar ikutan yang memotong struktur utama (diperlihatkan oleh zona yang ditandai dengan lingkaran kuning). Hal yang sama yaitu pelonjakan nilai resistivitas ($> 10 \Omega m$) di sekitar sesar ikutan yang memotong struktur utama (lapangan bagian Selatan) juga ditunjukkan oleh zona yang ditandai lingkaran putih.

Zona dekat sesar yang berpengaruh pada pelonjakan nilai resistivitas ($> 10 \Omega m$), diperkirakan merupakan zona lemah yang memungkinkan fluida bawah permukaan untuk menerobos hingga ke permukaan dan menggerus lapisan lempung tipis yang telah mengalami pensesaran. Keterdapatn manifestasi air panas pada permukaan di daerah pengukuran MT, disekitar zona lemah yang ditandai lingkaran putih (Gambar 5b) adalah hal yang mempertegas kondisi tersebut.



Gambar 5a Posisi *Intersection* Pada Lapangan Penelitian Bagian Selatan (Tampak Atas). 5b Hasil Sayatan terhadap Section 3D-MT Bawah Permukaan (Tampak Selatan).
 Catatan : Jarak antara koordinat X dan Y (*Longitude dan Latitude*)
 n dengan n+1 sama dengan 2000 m (n = Y atau X)

Manifestasi mata air panas pada kelompok BND-1, BND-2 dan BND-3 menunjukkan bahwa air panas bertipe air SO₄ (Asam Sulfat). Diduga bahwa air asam sulfat tersebut berasal dari oksidasi H₂S yang terjadi pada zona vadose (dalam zona *overburden*). Asumsi ini diperkuat oleh kondisi resistivitas batuan bawah permukaan yang memiliki nilai resistivitas 10 – 30 Ω.m pada kedalaman mencapai 100 m (di atas lapisan *clay cap*). Hal tersebut dapat menjelaskan keterdapatannya fluida yang mengandung oksigen. Reaksi oksidasi H₂S yang berkondensasi dan membentuk hidrogen sulfida adalah sebagai berikut :



Pada teori mengenai fluida hidrotermal, dikatakan bahwa fluida panas bumi yang berada paling dekat dengan magma mengandung senyawa H₂S yang bersifat reaktan. Dengan mempertimbangkan kedua kondisi tersebut, maka diinterpretasikan bahwa fluida yang keluar sebagai manifestasi mata air panas asam sulfat di daerah penelitian merupakan fluida magmatik yang keluar menerobos permukaan dengan kecepatan yang tinggi. Dengan kondisi demikian maka diketahui bahwa daerah penelitian merupakan daerah dengan zona aliran ke atas (*upflow*).

Sesuai sifat alaminya, gradien hidrologi fluida cenderung mengikuti topografi. Kondisi ini menyebabkan fluida memiliki kecenderungan untuk bergerak ke arah topografi yang lebih rendah dan menjauhi wilayah yang memiliki kondisi topografi yang lebih tinggi. Kondisi ini menyebabkan adanya aliran lateral ke arah Selatan dari daerah penelitian, yaitu ke arah aliran sungai yang memiliki topografi lebih rendah. Kondisi ini diperkuat oleh keterdapatannya manifestasi mata air panas karbonat (HCO_3) di daerah WNS-2 dan ARP-2 sekitar 5000 m dari mata air panas asam sulfat. Air karbonat merupakan penciri adanya aliran lateral atau aliran keluar (*out flow*), karena keterdapatannya merupakan hasil reaksi fluida magmatik yang mengandung CO_2 yang (sifatnya tidak lebih mudah bereaksi dibanding senyawa H_2S) dengan air lingkungan sekitar (air meteorik).

Dari model tentatif dan interpretasi di atas, maka diketahui bahwa tipe sistem geothermal daerah penelitian merupakan sistem yang berhubungan dengan tektonik dan terletak di lingkungan busur vulkanik (*volcanic arc*). Topografi sistem geothermal berada pada dataran tinggi (*high relief*) dengan arah aliran lateral yang ekstensif (*long outflow*). Transfer energi yang terjadi pada sistem geothermal daerah penelitian secara konveksi, mengklasifikasikan bahwa sistem ini termasuk sistem hidrotermal. Sistem hidrotermal dalam sistem geothermal ini termasuk dalam sistem terbuka dan terputar (*cyclic system*) yang melibatkan aliran hidrologi dalam dan dangkal. Kondisi dimana air permukaan (meteorik) masuk, terpanaskan dan muncul kembali ke permukaan, sistem ini melibatkan kondisi permeabilitas yang baik. Karena sistem ini melibatkan kombinasi antara hidrotermal dan sistem vulkanik, maka sistem geothermal daerah penelitian termasuk dalam tipe sistem magmatik-hidrotermal. Dibawah lapisan impermeabel, ditemukan reservoir berada pada kedalaman ≤ 1350 m dan memiliki temperatur tinggi yaitu $> 225^\circ\text{C}$. Reservoir sistem geothermal daerah penelitian terdiri atas dua fasa dan termasuk sistem dominasi air.

5. KESIMPULAN

Dari Delineasi Sistem Geothermal seperti Gambar 4 dan berdasarkan Analisis Geofisika, Geokimia dan Geologi, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Zona reservoir geothermal berada pada bagian Utara dan Timur lokasi pengukuran MT dengan kedalaman ≤ 1350 m. Hal tersebut ditandai oleh terdapatnya lapisan dengan resistivitas 20-75 Ωm yang berada

di bawah zona yang bersifat lebih konduktif dengan harga resistivitas $\leq 10 \Omega\text{m}$.

2. Aliran hidrotermal memiliki pola pergerakan dari arah Utara ke arah Selatan lapangan penelitian.
3. Fasa fluida yang mendominasi sistem ini adalah fasa cair, dengan kapasitas $> 90\%$. Temperatur reservoir termasuk dalam kategori suhu tinggi yaitu $> 225^\circ\text{C}$.

DAFTAR PUSTAKA

- Bartucz, D. 2009. *Exploration of Geothermal Systems with Petrel Modeling Software*. University of Iceland dan University of Akureyri. Akureyri.
- BSN (Badan Standarisasi Nasional). 1998. *Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi Di Indonesia*. SNI 13-5012-1998. Indonesia.
- Herdianita, R. 2008. *Geothermal and Hydrothermal System*.
- Hochstein, M. P. 1992. *World Wide Occurrence of Geothermal Resources, Convective, and Non-convective System*. Geothermal Institute.
- IEA (International Energy Association), 2007. *Geothermal*. <http://www.iea-gia.org/annex3.asp>
- Marini, L. 2001. *Geochemical Techniques For the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy*. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Universita degli Studi Genova, Italia.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids ; Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Jerman.
- Nurwianti, W. 2010. *Karakteristik Panas Bumi Disepanjang Lintasan Garut Pangalengan Berdasarkan Data Magnetotellurik*. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung.
- Saptadji, N. M. 2002. *Teknik Panas Bumi*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Simpson, F. dan Bahr K. 2005. *Partical Magnetotellurics*. Cambridge University Press. USA.
- Suparno, S. 2009. *Energi Panas Bumi - A Present From the Heart of the Earth*. Universitas Indonesia. Jakarta.