

STUDI AWAL KARAKTERISTIK POLA RESISTIVITAS SISTEM PANAS BUMI TEMPERATUR RENDAH-MENENGAH DI INDONESIA

Dadan Wildan ^{*)}, Syafrima Wahyu ^{**)}

Ilmu-Fisika Eksplorasi Geothermal Universitas Indonesia, Salemba, Jakarta

^{*)} Email : dadanwildan2000@yahoo.com

^{**)} Email : syafrima.wahyu@yahoo.com

Abstrak

Pemetaan nilai resistivitas sangat diperlukan untuk menentukan bagian-bagian dari sistem panas bumi. Nilai resistifitas tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain porositas batuan, saturasi fluida, suhu dan salinitas serta tipe/kandungan mineral lempung yang terbentuk pada suatu lapisan yang merupakan faktor utamanya. Dengan menggunakan metode geolistrik didapatkan nilai resistifitas pada sistem panas bumi temperatur rendah – menengah oka, wai selabung, banda baru, maranda, sembalun, dan bonjol, untuk penudung resistivitas 8 – 50 Ωm dan reservoir 50 – 250 Ωm . Diduga nilai rendah pada lapisan penudung diakibatkan keberadaan mineral lempung smectite dan chlorite yang terbentuk pada temperatur < 180 °C dengan nilai CEC 120 dan 10.

Kata Kunci : sistem panas bumi, resistivitas, mineral lempung, CEC

Abstract

Electrical resistivity is a common geophysical method to identify component in geothermal system. Resistivity value is affected by porosity, fluid saturation, temperature, salinity and the most important is type/proportion of clay minerals. By using geoelectric method resistivity values obtained at low – intermediate temperature of the geothermal system oka, wai selabung, banda baru, maranda, sembalun and bonjol, for clay cap and reservoir are between 8 – 50 Ωm and 50 – 250 Ωm respectively. The low resistivity is possibly due to occurrence of smectite and chlorite which formed on temperature < 180°C with Cation Exchange Capacity (CEC) value ranging from 120 -10.

Keywords: Geothermal System, resistivity, clay minerals, CEC.

1. Pendahuluan

Sistem panas bumi memiliki berbagai sistem dengan temperatur yang bervariasi antara lain *High Temperature System* ($T > 225$ °C), *Moderate Temperature System* (125 °C $> T > 225$ °C) dan *Low Temperature System* ($T < 125$ °C). Masing-masing sistem panas bumi tersebut memiliki beberapa perbedaan dalam tiap-tiap elemen penyusunnya, baik Clay Cap, Batuan Reservoir, Heat source dan Fluida. Perbedaan ini berkaitan erat dengan proses terbentuknya dari masing-masing panas bumi tersebut dan proses erupsi maupun alterasi hidrothermal yang terjadi. Hal tersebut sangat berpengaruh terhadap karakteristik batuan yang terbentuk, baik porositas, densitas, saturasi, permeabilitas, serta mineral lempung yang terkandung dalam batuan tersebut.

Nilai resistivitas pada sistem geothermal dominan dipengaruhi oleh beberapa parameter fisis yaitu resistivitas fluida, porositas, saturasi fluida, suhu dan salinitas sebagaimana hukum archie :

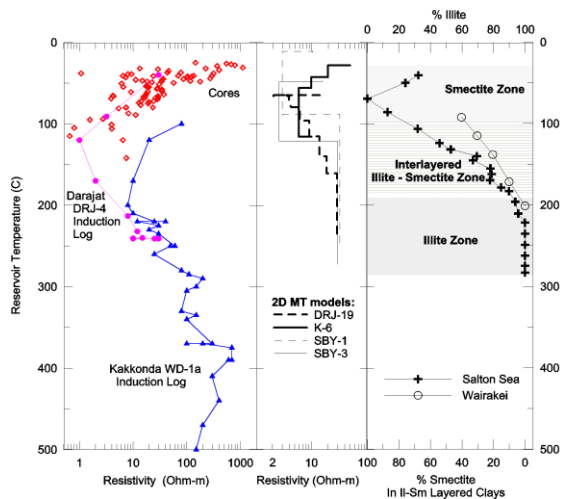
$$\rho = a \rho_w \phi^{-n} S_w^{-m} \quad (1)$$

Yang kemudian dikembangkan oleh Caldwell (1986) dengan menambahkan pengaruh kandungan dan tipe mineral lempung yang terdapat di sistem geothermal.

$$\rho = a \rho_w \phi^{-n} S_w^{-m} (1 + KC \rho_w)^{-l} \quad (2)$$

Usher, dkk (2000) menguraikan karakteristik resistivitas batuan pada sistem panas bumi suhu tinggi dengan mengambil bahan studi dari Lapangan Panas Bumi Darajat, Kakkonda, Salton Sea dan Wairakei. Dari hasil penelitiannya, Usher menyimpulkan bahwa pada sistem geothermal suhu tinggi faktor yang paling mempengaruhi nilai resistivitas adalah tipe dan kandungan mineral lempung. Adanya mineral lempung terhadap kedalaman menghasilkan pola resistivitas “high-low-high”.

Pada batuan yang kaya lempung, dengan air pori yang salinitasnya rendah, resistivitas batuanya akan berbanding terbalik dengan kapasitas pertukaran kation pada lempung. Salinitas tinggi, ketebalan lapisan ganda berkurang maka konduktivitasnya rendah (resistivitas tinggi)



Gambar 1. Hubungan temperatur yang berbanding lurus dengan kedalaman terhadap resistivitas, bagian tengah menunjukkan hasil permodelan 2D MT hubungan antara resistivitas terhadap kedalaman, sebelah kanan menunjukkan hubungan antara kandungan jenis mineral lempung terhadap kedalaman. (Greg Usher, 2000)

Tabel 1. Nilai CEC (kemampuan bertukar kation) mineral lempung

Mineral Lempung	Nilai CEC	Rata-rata CEC	Suhu Terbentuk
Kaolinite	3 – 15	10	150 – 250 °C
Smectite	80–150	120	< 180 °C
Illite	10 – 40	20	200 – 250 °C
Chlorite	10 – 40	20	200 – 300 °C

Penelitian ini akan mencoba untuk menguraikan pola resistivitas yang dijumpai pada system panas bumi suhu rendah sampai sedang dengan mengambil bahan studi dari hasil penelitian geolistrik di beberapa daerah panas bumi di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan studi literatur geolistrik sistem panas bumi temperature rendah-menengah sebagai salah satu metode geofisika dalam tahap eksplorasi untuk memetakan resistivitas bawah permukaan. Penelitian ini juga didukung oleh literasi data geologi dan geokimia(geothermometer). Studi literatur meliputi daerah panas bumi Oka, Kab, Flores Timur, NTT ; Wai Selabung, Sumatera Selatan ; Banda Baru, Maluku ; Maranda, Sulawesi Tengah ; Sembalun, NTB ; dan Bonjol, Sumatera Barat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah Panas Bumi Oka, Kab. Flores Timur-NTT

Daerah panas bumi Oka berada di daerah vulkanik Kuarter. Manifestasi yang dijumpai adalah berupa

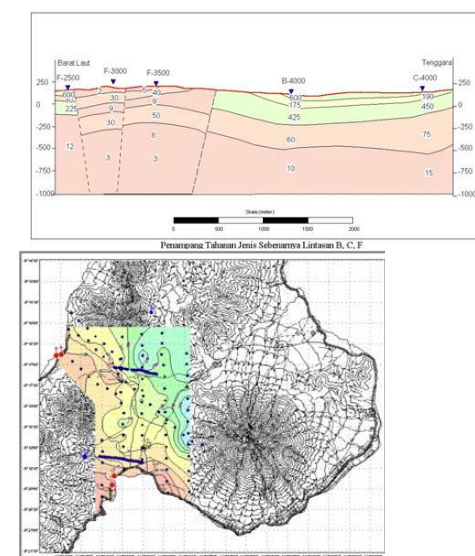
mata airpanas dan batuan ubahan dengan intensitas rendah-sedang. Tipe airpanas di daerah ini adalah tipe khlorida dan tipe sulfat khlorida. Estimasi suhu bawah permukaan menggunakan perhitungan geothermometer silika berkisar antara 162 – 173°C. Kenampakan batuan ubahan adalah berwarna putih – putih kekuningan, mengandung mineral lempung kaolin, alunit dan kristobalit. Sumber panas di daerah ini diduga berada dibawah dari tubuh vulkanik G. Waikerawak atau gunung Kadeka yang diketahui sebagai kerucut muda (Kuarter).

Resistivitas

Pada umumnya penampang-penampang lintasan di daerah ini mempunyai 4 buah lapisan yaitu lapisan pertama merupakan lapisan permukaan dengan variasi tahanan jenis 115 – 175 Ωm, mempunyai ketebalan antara 50 –250 meter. Lapisan kedua mempunyai variasi tahanan jenis 125 – 500 Ωm dengan ketebalan rata-rata 175–225 meter. Lapisan selanjutnya adalah lapisan dengan variasi tahanan jenis 40–120 Ωm pada ketebalan antara 200–300 meter dan lapisan yang paling bawah adalah tahanan jenis dengan variasi 8 – 25 Ωm dengan ketebalan lebih besar dari 500 meter.

Pada penampang lainnya lapisan pertama mempunyai tahanan jenis antara 175 – 190 Ωm dengan sisipan tahanan jenis 600 Ωm, mempunyai ketebalan 75–100 meter di bagian tenggara. Lapisan kedua mempunyai tahanan jenis antara 425 – 450 Ωm dengan ketebalan 150-300 meter, kemudian lapisan ketiga mempunyai tahanan jenis 60–75 Ωm dengan ketebalan 300 – 450 Ωm dan lapisan yang paling bawah mempunyai ketebalan lebih besar dari 500 meter dengan tahanan jenis 10–15 Ωm.

Zona tahanan jenis semu rendah (< 25 Ωm) diperkirakan berupa lapisan batuan penudung. Kedalaman reservoir di daerah ini diperkirakan berada lebih dari 1.000 meter



Gambar 2. Peta Resistivity AB/2= 1000 m (Bakrun, 2003)

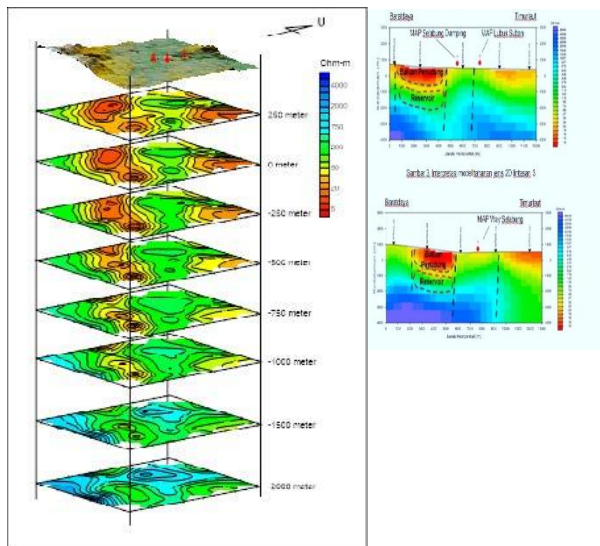
Daerah Panas Bumi Wai Selabung, Kabupaten Oku Selatan, Provinsi Sumatera Selatan

Wai Selabung secara tatanan tektonik berada pada busur magmatik Sumatera dan tepat pada salah satu segmen sesar Sumatera bagian selatan. Daerah Danau Ranau merupakan penciri tatanan tektonik tersebut, dimana pembentukannya merupakan akibat proses vulkanisme dan tektonisme yang membentuk suatu Kaldera besar dengan material piroklastik yang tersebar luas di sekitarnya. Posisi Wai Selabung sekitar 20 km di bagian utara Danau Ranau.

Keberadaan panas bumi daerah ini dicirikan dengan munculnya manifestasi berupa air panas dengan temperatur 92°C, pH netral, dan alterasi batuan dengan tipe alterasi argilik. Fluida panas bertipe klorida - bikarbonat berada pada zona immature water. Temperatur reservoir diambil melalui perhitungan geotermometer Na-K berkisar antara 146 -176°C, termasuk entalpi sedang.

Resistivitas

Tahanan jenis rendah (< 50 ohm-m) yang diinterpretasikan sebagai batuan ubahan tersebar di sebelah baratdaya dari dekat permukaan hingga kedalaman sekitar 1500 meter dengan ketebalan antara 1000 meter hingga 1500 meter. Di bagian bawahnya tersebar nilai tahanan jenis sedang (50 – 250 ohm m) yang diinterpretasikan sebagai zona reservoir. Puncak dari reservoir ini berada pada kedalaman sekitar 1500 meter di bawah permukaan tanah dan memiliki ketebalan sekitar 1000 meter.



Gambar 3. Peta Resistivity Panas Bumi Wai Selabung (Nur Hadi, 2011)

Tahanan jenis rendah yang tersebar di sebelah timurlaut diperkirakan berbeda dengan tahanan jenis rendah yang berada di baratdaya. Tahanan jenis rendah yang berada di timurlaut cenderung memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai tahanan jenis rendah di sebelah baratdaya, sehingga diinterpretasikan sebagai batuan sedimen tersier yang merupakan basemen dari sistem panas bumi di daerah

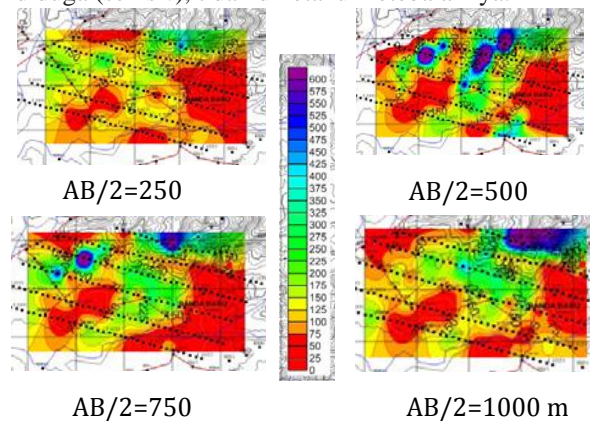
ini. Tahanan jenis tinggi tersebar di sebelah selatan dan bagian tengah daerah survei. Tahanan jenis tinggi ini diinterpretasikan sebagai batuan beku yang menjadi indikasi terdapatnya sumber panas.

Daerah Panas Bumi Banda Baru, Maluku Tengah, Provinsi Maluku

Daerah panas bumi Banda Baru terletak di Desa Banda Baru, Kecamatan Amahai, Kabupaten Maluku Tengah Provinsi Maluku. Prospek panas bumi didaerah ini dicirikan dengan adanya manifestasi panas bumi dipermukaan yang berupa mata air panas dan batuan sinter karbonat disekitar desa Banda baru. Daerah ini ditutupi oleh batuan aluvium dan malihan.

Resistivitas

Perlapisan batuan terdiri dari empat lapisan, yaitu : lapisan pertama yang merupakan lapisan penutup/soil mempunyai harga tahanan jenis bervariasi antara > 250- 1350 Ohm-m dengan ketebalan lapisan 1 – 20 m, di bawah lapisan ini terdapat tahanan jenis >50 – 150 Ohm-m dengan ketebalan 20 - 70 m diduga merupakan lapisan alluvial (pasir, kerakal, kerikil), kemudian pada lapisan ke tiga dengan tahanan jenis < 50 Ohm-m dengan ketebalan 200 – 300 m diduga batuan metamorf yang teralterasi, dan lapisan ke empat dengan tahanan jenisnya >150 – 2450 Ohm-m diduga (sekis ?), tidak diketahui ketebalannya.

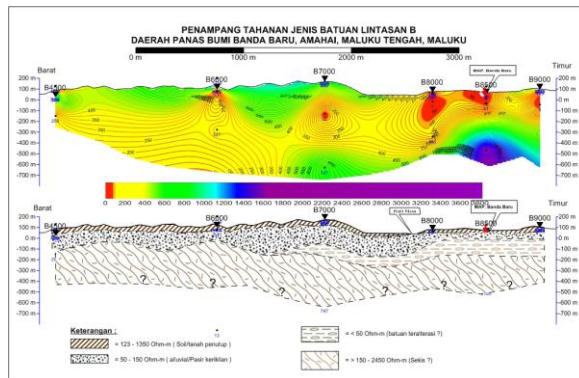


Gambar 4. Peta Resistivity Panas Bumi Banda Baru (Eddy Sumardi, 2011)

Tabel 2. Sebaran batuan, dan resistivity vs kedalaman Banda Baru

Perlapisan	Ketebalan (m)	Tahanan jenis (Ohm m)	Nama Batuan
Lapisan 1	1-20	>250-1350	Lapisan Penutup/Soil
Lapisan 2	20-70	50-150	Alluvial (Pasir, kerakal, kerikil)

Lapisan 3	200-300	< 50	Batuan Teralterasi ?
Lapisan 4	?	>150-2450	Sekis ?



Gambar 5. Penampang Resistivity (Eddy Sumardi, 2011)

Daerah Panas Bumi Maranda, Kabupaten Poso, Propinsi Sulawesi Tengah

Daerah panas bumi Maranda yang lingkungan geologinya tidak berasosiasi dengan gunungapi, kemungkinan berhubungan dengan batuan termuda (Kuarter) berupa tubuh batuan plutonik yang masih memiliki sisa panas dan tidak muncul di permukaan. Sisa panas dalam tubuh batuan plutonik inilah yang diperkirakan menjadi sumber panas dalam sistem panas bumi Maranda.

Aktivitas tektonik terakhir pada Plio-Plistosen menghasilkan beberapa sesar normal berarah relatif barat-laut-tenggara seperti Sesar Maranda, Patangolemba, Mauro, dan Sesar Sincang sebagai generasi sesar paling muda. Sesar Maranda dan Sesar Sincang mengontrol kehadiran beberapa manifestasi panas bumi di daerah Maranda. Kelompok Manifestasi Maranda terdiri atas air panas, lumpur panas, tanah beruap (*steaming ground*), dan batuan ubahan.

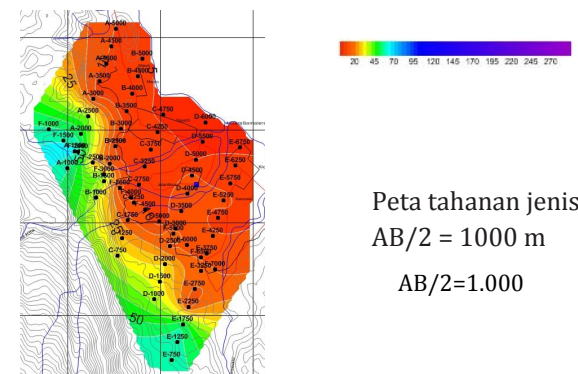
Hasil analisa diagram segi tiga Cl-SO₄-HCO₃, air panas Maranda terletak pada posisi zona klorida yang condong ke arah sulfat. Perkiraan temperatur minimal reservoir daerah panas bumi Maranda dengan menggunakan geotermometer silika adalah 180°C.

Resistivitas

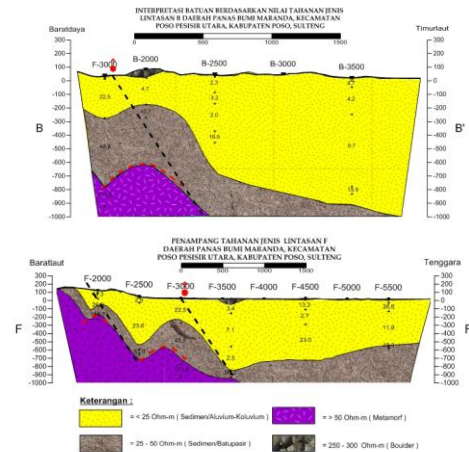
Interpretasi nilai tahanan jenis terdapat 3 jenis batuan dengan nilai tahanan jenis yang bervariasi yaitu :

1. Batuan dengan nilai tahanan jenis < 25 ohm-m dengan ketebalan bervariasi 200 - 800 m merupakan batuan aluvium yang mendominasi bagian timur laut daerah penyelidikan. Nilai tahanan jenis rendah ini dimungkinkan karena karakteristik endapan sedimen yang terdiri dari endapan aluvium dan endapan rombakan dari batuan metamorf (koluvium) yang memiliki nilai tahanan jenis rendah.

2. Batuan dengan nilai tahanan jenis 25 - 50 ohm-m dengan ketebalan mencapai 400 m merupakan batuan sedimen yang di duga berupa batupasir.
3. Batuan dengan nilai tahanan jenis > 50 ohm-m merupakan batuan metamorf.



Gambar 6. Peta Resistivity Panas Bumi Maranda (Dendi, 2011)



Gambar 7. Penampang Resistivity Panas Bumi Maranda (Dendi, 2011)

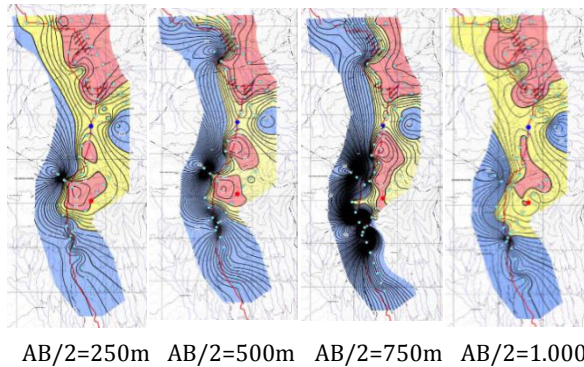
Daerah Panas Bumi Sembalun, Kabupaten Lombok Timur – Ntb

Munculnya manifestasi panas bumi di daerah Sembalun berupa mata air panas dengan temperatur antara 32°C – 36 °C. Air panas termasuk pada tipe air panas klorida – bikarbonat. Temperatur bawah permukaan yang berhubungan dengan reservoir panas bumi, menggunakan persamaan geotermometer Na/K Gigenbach adalah 165°C, termasuk kedalam entalphi sedang.

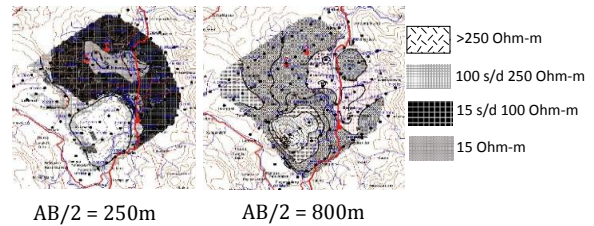
Resistivitas

Secara umum perlapisan batuan di bagi menjadi empat. Lapisan pertama yaitu lapisan permukaan, dengan variasi kedalaman dan tahanan jenis. di sisi baratdaya tersusun oleh tahanan jenis tinggi dengan tebal sekitar 20-50 m Lapisan kedua memiliki tebal 300 m (tengah dan timurlaut) sampai 500 m (baratdaya). Sisi tengah dan timurlaut memiliki tahanan jenis sekitar 70-90 Ωm, Dibawah lapisan kedua, tersusun lapisan bertahanan jenis rendah, di bawah 50 Ωm, dengan tebal lapisan diperkirakan 300-

400 m kedalaman 500 m di bawah permukaan. Lapisan ke empat tersusun batuan bertahanan jenis tinggi di atas 100 Ω m. lapisan resevoir berada pada lapisan ke empat dengan nilai tahanan jenis di atas 100 Ω m pada kedalaman di bawah 700 m. Sedang lapisan bertahanan jenis rendah lebih kecil dari 50 Ω m adalah lapisan penudung dengan tebal sekitar 300 meter.

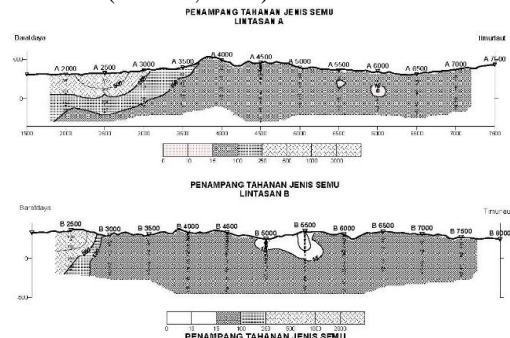


AB/2=250m AB/2=500m AB/2=750m AB/2=1000

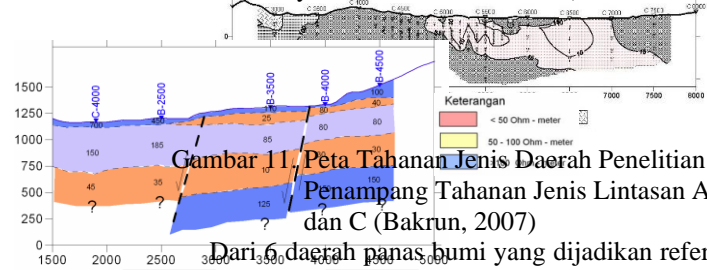


AB/2 = 250m AB/2 = 800m

Gambar 10. Peta Resistivity Panas Bumi Bonjol (Bakrun, 2007)



Gambar 8. Peta Resistivity Panas Bumi Sembalun (M. Nur Hadi, 2007)



Gambar 11. Peta Tahanan Jenis Daerah Penelitian dan Penampang Tahanan Jenis Lintasan A, B dan C (Bakrun, 2007)

Gambar 9. Peta tahanan jenis semu dan penampang tahanan jenis (M. Nur Hadi, 2007)

Daerah Panas Bumi Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat

Keberadaan daerah panas bumi Bonjol diindikasikan oleh adanya beberapa mata air panas dengan temperatur 49,7 - 87,9°C. Temperatur bawah permukaan menggunakan geotermometer SiO₂ adalah 168°C dan NaK adalah 188°C. Sistem panas bumi di daerah Bonjol, kemungkinan adalah *up flow* tipe vulkanik.

Resistivitas

Perolehan peta tahanan jenis semu untuk masing-masing bentangan AB/2 dapat dikelompokkan sebagai berikut.

1. Kelompok tahanan jenis > 250 Ohm-m berupa lava kuarter
2. Kelompok tahanan jenis 100-250 Ohm-m berupa lava
3. Kelompok tahanan jenis 15 - 100 Ohm-m berupa lava tuang dan diperkirakan sebagai batuan resevoir
4. Kelompok tahanan jenis < 15 Ohm-m batuan teralterasi yang diperkirakan sebagai batuan penudung.

Dari 6 daerah panas bumi yang dijadikan referensi diantaranya yaitu Daerah panas bumi Oka, Selabung, Sembalun dan Bonjol terkait dengan aktifitas vulkanisme, sedangkan daerah panas bumi Banda Baru dan Maranda tidak terkait dengan aktifitas vulkanisme.

Karakteristik batuan yang bertindak sebagai reservoir dan penudung di masing-masing lokasi panas bumi ditunjukkan oleh tabel 3.

Pola penyebaran resistivitas arah lateral/horizontal di enam lokasi studi dipengaruhi oleh adanya struktur geologi yang bertindak sebagai permeabilitas sekunder untuk masuknya fluida.

Untuk mengetahui pola resistivitas ke arah vertikal maka dibuat grafik resistivitas terhadap kedalaman seperti dapat dilihat pada grafik gambar 12.

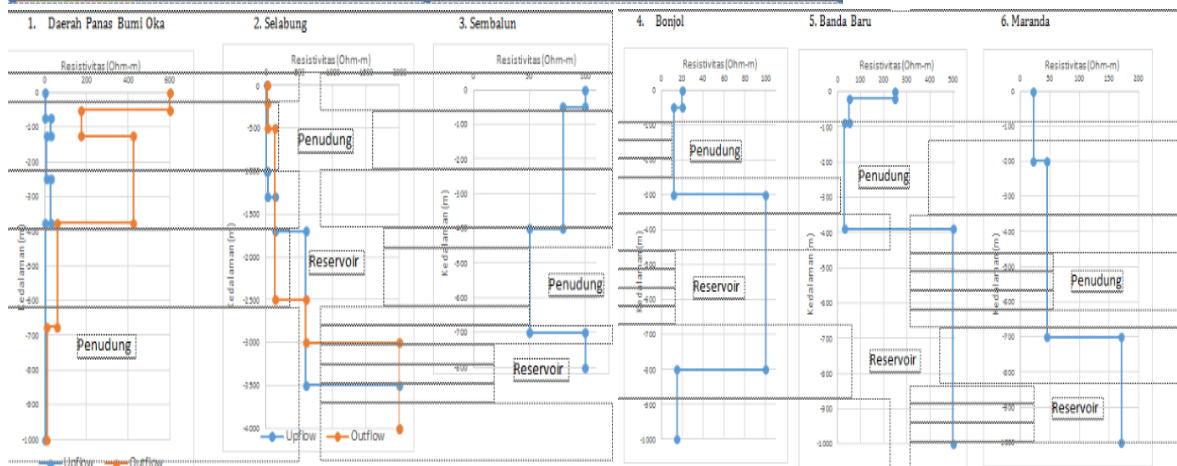
Dari keenam grafik penampang resistivitas diatas terlihat pola umum "high-low-high" pada sistem panas bumi temperatur tinggi juga dijumpai pada sistem panas bumi temperatur rendah –sedang.

Walaupun dari ke enam lokasi penelitian tidak ada satupun yang menyebutkan tipe lempung yang terbentuk akibat proses alterasi yang terjadi di masing-masing daerah namun berdasarkan pengaruh suhu yang terjadi di lokasi tersebut lebih rendah daripada 200°C maka dapat diinterpretasikan bahwa di mineral lempung yang terbentuk di sistem panas bumi temperatur rendah adalah pada golongan smectite dan chlorite yang memiliki nilai resistivitas yang rendah. Dalam hal ini nilai CEC mineral

menentukan nilai resistivitas rendah maupun menengah.

Tabel 3. Karakteristik Resistivity berbagai Panas Bumi Temperatur Rendah – Menengah

Parameter/ Lokasi	Oka	Selabung	Semalun	Bonjol	Banda Baru	Maranda
Reservoir	Pyroclastic flow	Batuan lava tua dan sedimen terdeformasi kuat	piroklastik	Lava	Fractured Metamorphic rocks	Fractured Metamorphic rocks
Penudung	Altered Andesitic Lava	Argillic altered volcanic rock	piroklastik	Altered volcanic rock dan clay bearing sediment	Altered Schist	Argillic altered claystone
Kedalaman top Reservoir (m)	> 1.000	>1.500	>700	>1.000	???	>1.000
Ketebalan penudung (m)	500 m	1.000-1.500	300 pada kedalaman 400 meter	300 pada kedalaman 500 meter	200-300	300
Resistivitas (Ohm-m)	<25 (penudung)	<50 (penudung) 50 - 250 (reservoir)	<50 (penudung) >100 (reservoir)	<15 (penudung) 15 - 100 (reservoir)	<50 (penudung) >150-2450 (reservoir)	25-50 (penudung) >50 (reservoir)
Suhu geotermometer (°C)	162-173	176	165	168 (SiO ₂), 188 (NaK)	150 - 200	180 (SiO ₂)



Gambar 12. Pola Resistivity berbagai Panas Bumi Temperatur Rendah – Menengah

4. Kesimpulan

1. Pola resistivitas “high-low-high yang dijumpai pada sistem panas bumi temperature tinggi juga dijumpai pada sistem panas bumi temperature rendah-sedang.
2. Perbedaan antara pola resistivitas sistem panas bumi temperatur tinggi dengan sistem panas bumi temperatur rendah – sedang kemungkinan besar adalah tipe mineral lempung yang terbentuk hasil alterasi, dimana pada sistem panas bumi temperatur rendah – sedang kemungkinan besar hanya dijumpai tipe mineral lempung smectite dan chlorite, dan akan kecil sekali ditemukan mineral illite dan zona interlayer illite-smectite.
3. Nilai CEC mineral lempung smectite lebih besar 12 kali dibandingkan chlorite sehingga nilai resistivitas akan lebih rendah.
4. Faktor temperatur, salinitas, porositas dan saturasi fluida berpengaruh terhadap nilai resistivitas lapisan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan-rekan magister ilmu fisika – eksplorasi geothermal UI 2014 atas diskusi selama penelitian.

DAFTAR ACUAN

Bakrun, dkk., 2003, Penyelidikan terpadu Daerah Panas Bumi Oka, Kab. Flores Timur, NTT.
 Bakrun, dkk., 2007, Survey Geolistrik dan Head-On di Daerah Panas Bumi Bonjol Kab. Pasaman, Prov. Sumatera Barat.
 Browne, P.R.L., 1978. Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields. Ann. Rev. Earth Planet Sci., 6, p. 229-250.
 Nur Hadi, M. dkk, 2007, Penyelidikan Geolistrik dan Head-On Daerah Panas Bumi Semalun, Kab. Lombok Timur, NTB.
 Nur Hadi, Mochamad dkk., 2011, Survei Terpadu Geologi, Geokimia, Dan Geofisika Daerah Panas Bumi Wai Selabung, Kab. Oku Selatan, Prov. Sumatera Selatan
 Sumardi, Eddy dkk., 2011, Survei Geofisika Terpadu Banda Baru, Maluku Tengah, Prov. Maluku.
 Surya K., Dendi dkk., 2011, Penyelidikan Geofisika Terpadu Daerah Panas Bumi Maranda Kabupaten Poso, Prov Sulawesi Tengah.
 Surya K., Dendi dkk., 2011, Penyelidikan Geofisika Terpadu Daerah Panas Bumi Maranda, Kab. Poso, Prov. Sulawesi Tengah.
 Usher, Greg, et.al., 2000, Understanding The Resistivities Observed in Geothermal System.