

GEOLOGI DAN STUDI GEOKIMIA FLUIDA BERDASARKAN DATA SUMUR DAN MANIFESTASI PADA SISTEM PANAS BUMI LAPANGAN “OKU”, PROVINSI SUMATERA SELATAN

Evans Kristo Salu^{*)}, Dwi Fitri Yudiantoro^{*)}, IB. Jagranatha^{*)}
^{*)}Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral
 Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
 Jl. SWK 104, Condong Catur 55283, Yogyakarta, Indonesia
 Fax/Phone : 0274-487816;0274-486403

SARI - Lokasi penelitian berada di Lapangan OKU, yang secara administratif terletak di Provinsi Sumatera Selatan. Penelitian dilakukan dengan menganalisis data sekunder yang terdiri dari data manifestasi dan data bawah permukaan (data sumur) untuk mendapatkan zonasi sistem panas bumi (zona *upflow* dan *outflow*), perkiraan nilai temperatur fluida reservoir, dan model sistem panas bumi lapangan ini.

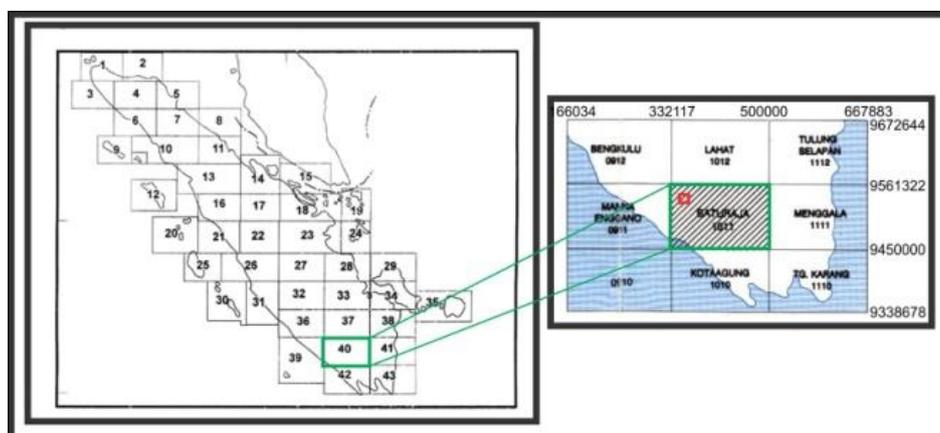
Lapangan Panas Bumi OKU disusun oleh kompleks batuan gunungapi Kuartar yang terdiri dari 19 satuan batuan dan delapan diantaranya terekam di dalam sumur-sumur pemboran. Satuan-satuan tersebut terbagi menjadi kelompok satuan fase pre-kaldera, kaldera, dan post-kaldera. Manifestasi air panas Lapangan OKU terbagi menjadi dua tipe air, yaitu air sulfat yang terletak di sisi timurlaut Gn. Lumut dan air klorida yang terletak di kaki Bukit Bunbun. Di lapangan ini, air sulfat mencirikan zona *upflow*, sedangkan air klorida mencirikan zona *outflow*. Zona mineral ubahan pada sumur terdiri dari zona argilik, zona subpropilitik, dan zona propilitik. Zona argilik disusun oleh mineral smektit yang disertai oleh kalsit, dan pirit dengan perkiraan temperatur terbentuknya 30-170°C. Zona subpropilitik tersusun dari mineral klorit, illit, illit-smektit, klorit-smektit, kuarsa sekunder, dan kalsit dengan perkiraan temperatur terbentuknya 175-230°C. Zona propilitik disusun oleh mineral epidot, klorit, kuarsa sekunder, adularia, anhidrit, dan kalsit dengan perkiraan terbentuknya 200-330°C.

Sistem panas bumi Lapangan OKU termasuk ke dalam sistem panas bumi bertemperatur tinggi karena memiliki temperatur reservoir sebesar 248°-294°C dari hasil perhitungan temperatur menggunakan metode geotermometer. Zona argilik dan subpropilitik yang disusun oleh dominan mineral-mineral lempung ubahan diperkirakan sebagai zona penudung sistem, sedangkan zona propilitik yang disusun oleh mineral-mineral ubahan yang terbentuk pada temperatur tinggi (epidot dan adularia) diperkirakan sebagai zona reservoir sistem. Sumber panas sistem diperkirakan terletak di bawah sisi timurlaut Gn. Lumut dengan kedalaman yang tidak diketahui dan dicirikan oleh terdapatnya manifestasi gas dan air sulfat, serta merupakan zona *upflow*.

Kata-kata kunci: panasbumi, batuan gunungapi, fluida, geokimia.

PENDAHULUAN

Lapangan panas bumi Lumut-Balai terletak di Provinsi Sumatera Selatan. Lapangan Lumut-Balai terletak di tepi busur vulkanik Sumatera (Bukit Barisan). Lapangan ini terletak pada Gunung Lumut dan Gunung Balai serta kompleks pegunungan di antara keduanya. Lapangan ini terletak pada koordinat 346000 mE–361000 mE dan 9530000 mN–9544000 mN dan termasuk ke dalam zona 48S (Gambar 1). Dalam tulisan ini, penulis ingin meneliti tentang kondisi geokimia, geologi, dan sistem panas bumi daerah penelitian.



Gambar 1. Lapangan Panas Bumi Lumut-Balai yang terletak di Provinsi Sumatera Selatan.

METODE

Penelitian sistem panas bumi Lapangan OKU dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari PT Pertamina UTC. Data yang diterima terdiri dari :

- Peta Geologi Lapangan “OKU”, yang digunakan untuk membantu penulis dalam menentukan stratigrafi daerah penelitian menggunakan satuan batuan tidak resmi.
- Data geokimia air manifestasi ya yang terdiri dari data H1, H2, H3, H4, H5, H6, dan H7, data gas manifestasi yang terdiri dari data F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, dan F11, dan data geokimia air sumur yang terdiri dari data SA3, SA5, SA6, SC1, SC2, SC3, SC4, SE1, SF1, SG2, dan SG3. Data geokimia air dan gas tersebut digunakan untuk menentukan zona sistem panas bumi berdasarkan metode geokimia yang terdiri dari penentuan tipe air, asal air manifestasi dan sumur, asal gas manifestasi, dan arah aliran air bawah permukaan. Selain itu, data geokimia dapat digunakan untuk memperkirakan temperatur relatif reservoir menggunakan metode diagram dan metode geotermometer.
- Data unit litologi sumur yang terdiri dari data SA4, SA5, SA7, SA8, SB1, SC1, SC3, SD1, SE1, SF1, SG1, dan SG2. Data unit litologi digunakan untuk menentukan satuan batuan dan stratigrafi daerah penelitian.
- Data mineral alterasi beberapa kedalaman sumur, yaitu SE1, SF1, dan SG2, serta data zonasi himpunan mineral sumur SA4, SA5, SA7, SA8, SB1, SC1, SC3, SD1, dan SG1. Data mineral alterasi tiga sumur tersebut digunakan untuk menentukan zonasi himpunan mineral ubahan yang akan dibandingkan dengan zona mineral ubahan pada sumur lain yang diberikan.
- Profil temperatur dan tekanan vs kedalaman (P & T vs kedalaman) sumur SB1, SE1, dan SF1 untuk menentukan level air dan sistem dominasi panas bumi.

STRATIGRAFI LAPANGAN “OKU”

Pembagian satuan batuan di Lapangan OKU menggunakan pembagian satuan tidak resmi. Daerah ini disusun oleh 19 satuan batuan berdasarkan Peta Geologi Daerah Lumut-Balai (PGE, 2014) dan 8 diantaranya terekam dalam sumur-sumur lapangan ini yang terbagi ke dalam satuan fase pra-kaldera, kaldera, dan post-kaldera (Lampiran 1, Lampiran 2, dan Lampiran 3). Delapan satuan yang terekam dalam sumur adalah :

- Satuan piroklastik Semendo (Qpps)

Satuan ini tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari endapan piroklastik aliran berupa tuf lapili, serta sisipan lava andesit. Satuan ini memiliki umur 1,8 juta tahun (Pertamina, 2014) dan lebih tua dari satuan andesit Lumut-Balai (Qpalb).

- Satuan piroklastik Bukit Pandan (Qppbp)

Satuan ini tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari endapan piroklastik berupa tuf lapili, breksi andesit-basaltik, dan sisipan lava andesit. Satuan ini memiliki umur 1,5 juta tahun sehingga diperkirakan lebih tua dari satuan andesit Lumut-Balai (Qpalb) dan memiliki hubungan stratigrafi tidak selaras dengan satuan piroklastik Semendo (Qpps) (Pertamina, 2014).

- Satuan andesit Lumut-Balai (Qpalb)

Satuan ini disusun oleh litologi berupa breksi andesit, andesit, breksi tuf, dan andesit-basaltik. Satuan ini memiliki umur 1,2 juta tahun berdasarkan hasil dating batuan di permukaan dan diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi tidak selaras dengan satuan piroklastik Semendo (Qpps) (Pertamina, 2014).

- Satuan breksi Lumut-Balai (Qpblb)

Satuan ini disusun oleh litologi tuf lapili, breksi andesit, breksi tuf, dan sisipan andesit. Tuf lapili ditemukan di sebelah barat Bukit Asahan dengan membentuk pola morfologi punggung berarah utara-selatan dan merupakan endapan piroklastik aliran dengan fragmen batupung (Pertamina, 2014). Berdasarkan penarikan kesebandingan antar sumur, dapat diperkirakan bahwa satuan ini menyebar hampir semua sumur cluster kecuali sumur SB1. Satuan ini hanya menyebar di dalam struktur runtuh melingkar (kaldera) terutama pada bagian timur, selatan, dan timur kaldera, dan menyebar hingga ke bagian utara topografi kaldera hingga tersingkap di permukaan. Satuan ini memiliki umur 1 juta tahun berdasarkan hasil dating batuan di permukaan (Pertamina, 2014).

- Satuan andesit Balai-1 (Qpab1)

Satuan ini disusun oleh litologi andesit, breksi andesit, dan breksi tuf pada sumur-sumur Lapangan OKU. Berdasarkan penarikan kesebandingan satuan dari permukaan terhadap sumur-sumur pemboran, dapat diperkirakan bahwa satuan ini terdapat pada sumur SF1 dan SC1. Satuan ini memiliki umur 0,9 juta tahun berdasarkan hasil dating batuan di permukaan (Pertamina, 2014) dan termasuk ke dalam kala Plistosen. Satuan ini terletak selaras di atas satuan breksi Lumut-Balai dan merupakan produk tertua dari Kaldera Lumut-Balai.

- Satuan andesit Balai-2 (Qpab2)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari andesit dan breksi andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-1 (Pertamina, 2014) sehingga diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari.

- Satuan andesit Balai-3 (Qpab3)

Satuan ini disusun oleh litologi andesit, breksi andesit, breksi tuf, andesit-basaltik, dan tuf pada sumur-sumur Lapangan OKU. Berdasarkan penarikan kesebandingan satuan dari permukaan terhadap sumur-sumur pemboran, dapat diperkirakan bahwa satuan ini terdapat pada sumur SC1, SE1, dan SF1. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-1, dan satuan andesit Balai-2 (Pertamina, 2014) sehingga satuan ini diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari dengan satuan andesit Balai-1 karena memiliki umur yang sama, namun dengan posisi relatif lebih muda, dan memiliki hubungan stratigrafi menjari dengan satuan andesit Balai-2.

- Satuan andesit Balai-4 (Qpab4)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari andesit dan breksi andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-1, satuan andesit Balai-2, dan satuan andesit Balai-3 (Pertamina, 2014). Satuan ini diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari dengan satuan andesit Balai-1, satuan andesit Balai-3, dan satuan andesit Balai-5.

- Satuan andesit Balai-5 (Qpab5)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari lava andesit dan breksi andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-1, satuan andesit Balai-2, satuan andesit Balai-3, dan satuan andesit Balai-4 (Pertamina, 2014) sehingga satuan ini diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari dengan satuan andesit Balai-4.

- Satuan andesit Balai-6 (Qpab6)

Satuan ini disusun oleh litologi breksi andesit dan breksi tuf pada sumur-sumur Lapangan OKU, dan andesit-basaltik yang dijumpai di permukaan berdasarkan peta geologi. Berdasarkan penarikan kesebandingan satuan dari permukaan terhadap sumur-sumur pemboran, dapat diperkirakan bahwa satuan ini terdapat pada sumur SA4, SA5, SA7, SA8, SG1, dan SG2. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik setelah episode vulkanik satuan-satuan sebelumnya sehingga diperkirakan terletak selaras di atas satuan-satuan sebelumnya.

- Satuan andesit Balai-7 (Qpab7)

Satuan ini disusun oleh litologi andesit, breksi andesit, breksi tuf, dan andesit-basaltik pada sumur-sumur Lapangan OKU. Berdasarkan penarikan kesebandingan satuan dari permukaan terhadap sumur-sumur pemboran, dapat diperkirakan bahwa satuan ini terdapat pada sumur SA4, SA5, SA7, SA8, dan SD1. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-6 (Pertamina, 2014) sehingga diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari.

- Satuan andesit Balai-9 (Qpab9)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari andesit-basaltik. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-6 dan satuan andesit Balai-9 (Pertamina, 2014).

- Satuan andesit Balai-10 (Qpab10)

Satuan ini disusun oleh litologi andesit, breksi andesit, breksi tuf, dan andesit-basaltik pada sumur-sumur Lapangan OKU. Berdasarkan penarikan kesebandingan satuan dari permukaan terhadap sumur-sumur pemboran, dapat diperkirakan bahwa satuan ini terdapat pada sumur SE1 dan SF1. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik setelah episode vulkanik satuan-satuan sebelumnya sehingga diperkirakan terletak selaras di atas satuan-satuan sebelumnya.

- Satuan andesit Balai-11 (Qpab11)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-10 (Pertamina, 2014) sehingga diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari.

- Satuan andesit Balai-12 (Qpab12)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-10 dan satuan andesit Balai-11 (Pertamina, 2014) sehingga diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari dengan kedua satuan tersebut.

- Satuan andesit Balai-13 (Qpab13)

Satuan ini disusun oleh litologi breksi andesit dan breksi tuf pada sumur-sumur Lapangan OKU, dan andesit yang dijumpai di permukaan berdasarkan peta geologi. Berdasarkan penarikan kesebandingan satuan dari permukaan terhadap sumur-sumur pemboran, dapat diperkirakan bahwa satuan ini terdapat pada sumur SB1. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-10, satuan andesit Balai-11, dan satuan andesit Balai-12 (Pertamina, 2014) sehingga diperkirakan memiliki hubungan stratigrafi menjari dengan ketiga satuan tersebut.

- Satuan andesit Balai-14 (Qpab14)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari lava andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-10, satuan andesit Balai-11, satuan andesit Balai-12, dan satuan andesit Balai-13 (Pertamina, 2014). Satuan ini terletak secara selaras di atas satuan andesit Balai-4.

- Satuan andesit Gunung Tiga (Qpag)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari lava andesit dan breksi andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-10, satuan andesit Balai-11, satuan andesit Balai-12, satuan andesit Balai-13, dan satuan andesit Balai-14, namun waktu pembentukannya diperkirakan relatif lebih muda dari satuan-satuan tersebut (Pertamina, 2014). Satuan ini terletak secara selaras di atas satuan andesit Balai-1 dan satuan andesit Balai-4.

- Satuan andesit Panindayan (Qpap)

Satuan ini diperkirakan tidak terekam dalam sumur-sumur pemboran Lapangan OKU. Berdasarkan peta geologi, satuan ini tersusun dari andesit-basaltik dan breksi andesit. Satuan ini terbentuk pada episode vulkanik yang sama dengan satuan andesit Balai-10, satuan andesit Balai-11, satuan andesit Balai-12, satuan andesit Balai-13, dan satuan andesit Balai-14, namun waktu pembentukannya diperkirakan relatif lebih muda dari satuan-satuan tersebut (Pertamina, 2014). Satuan ini terletak secara selaras di atas satuan andesit Balai-6 dan satuan andesit Balai-7.

STRUKTUR GEOLOGI LAPANGAN “OKU”

Struktur geologi daerah penelitian memiliki empat pola struktur, yaitu struktur berarah timurlaut-baratdaya (TL-BD) dengan pergerakan turun, baratlaut-tenggara (BL-Tg), timur-timurlaut – barat-baratdaya (TTL-BBD) dengan pergerakan turun, dan utara-timurlaut – selatan-baratdaya (UTL-SBD) dengan pergerakan mendatar kanan serta satu pola struktur melingkar berdasarkan interpretasi citra SRTM dan Peta Geologi Lapangan “OKU” oleh PGE (2014).

ALTERASI HIDROTERMAL BAWAH PERMUKAAN

Zonasi himpunan mineral Lapangan OKU dapat dikelompokkan menjadi tiga zona himpunan, yaitu zona argilik, zona subpropilitik dan zona propilitik.

- Tipe Ubahan Argilik

Tipe ubahan argilik pada sistem panas bumi Lapangan OKU disusun oleh smektit dan disertai dengan kalsit, dan pirit.

- Tipe Ubahan Subpropilitik

Tipe ubahan subpropilitik pada sistem panas bumi Lapangan OKU terdiri dari mineral klorit, illit, illit-smektit, klorit-smektit, kuarsa sekunder, kalsit, dan pirit.

- Tipe Ubahan Propilitik

Tipe ubahan propilitik pada sistem panas bumi Lapangan OKU terdiri dari mineral epidot, klorit, kuarsa sekunder, adularia, anhidrit, kalsit, dan pirit.

Mineral-mineral ubahan terbentuk oleh pengaruh temperatur fluida hidrotermal termasuk pada Lapangan OKU. Maka dari itu temperatur fluida dapat diperkirakan berdasarkan kumpulan mineral dalam zona-zona ubahan pada lapangan ini dan disajikan dalam bentuk indeks temperatur (Gambar 5).

Indeks temperatur Lapangan OKU dibuat menggunakan data dari sumur SE1, SF1, dan SG2, dan disajikan dengan memperhatikan parameter temperatur pembentukan mineral dan kelompok/ golongan mineral ubahan (Tabel 1). Dari ketiga sumur diketahui bahwa semakin dalam, maka akan ditemukan mineral dengan suhu pembentukan yang semakin tinggi. Pada kedalaman yang lebih dangkal akan dijumpai mineral lempung seperti smektit, pada bagian tengah akan dijumpai mineral lempung lainnya seperti illit dan klorit yang mencirikan temperatur yang semakin tinggi, dan semakin dalam akan dijumpai mineral kalsium-silikat seperti epidot dan adularia yang mencirikan temperatur yang tinggi.

Zona argilik diperkirakan terbentuk pada temperatur 30°C-170°C jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Reyes (2000). Zona ini juga diperkirakan terbentuk pada pH sekitar asam jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Izawa (1993), dan Corbett dan Leach (1997) (Tabel 2.a).

Zona subpropilitik terbentuk pada temperatur 175°C-230°C jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Reyes (2000). Zona ini diperkirakan terbentuk pada pH yang mendekati netral jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Izawa (1993), dan Corbett dan Leach (1997) (Tabel 2. b).

Zona propilitik terbentuk pada temperatur 200°C-320°C jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Reyes (2000). Zona ini diperkirakan terbentuk pada pH sekitar netral jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Izawa (1993), dan Corbett dan Leach (1997) (Tabel 2.c).

Tabel 1. Indeks Temperatur Lapangan OKU berdasarkan mineral-mineral alterasi

Mineral Ubahan	Temperatur (°C)							
	0	50	100	150	200	250	300	340
Smektit	—————							
Illit-Smektit			—————					
Klorit-Smektit			—————					
Illit				—————				
Klorit				—————				
Pirit	—————				—————			
Kalsit	—————				—————			
Anhidrit				—————				
Kuarsa				—————				
Adularia				—————				
Epidot				—————				

Tabel 2. Perkiraan temperatur fluida panas bumi Lapangan OKU berdasarkan zona mineral alterasi sumur SE1, SF1, dan SG2; (a) zona argilik, (b) zona subpropilitik, dan (c) propilitik

Mineral Ubahan	Temperatur (°C)							
	0	50	100	150	200	250	300	340
Smektit	██████████							
Pirit	██████████				—————			
Kalsit	██████████				—————			

(a)

Mineral Ubahan	Temperatur (°C)							
	0	50	100	150	200	250	300	340
Illit-Smektit				██████████				
Klorit-Smektit				██████████				
Illit				██████████				
Klorit				██████████				
Pirit	██████████				—————			
Kalsit	██████████				—————			
Kuarsa				██████████				

(b)

Mineral Ubahan	Temperatur (°C)							
	0	50	100	150	200	250	300	340
Klorit				██████████				
Pirit	██████████				—————			
Kalsit	██████████				—————			
Anhidrit				██████████				
Kuarsa				██████████				
Adularia				██████████				
Epidot				██████████				

(c)

GEOKIMIA AIR DAN GAS

Data yang digunakan adalah data unsur kimia manifestasi air panas, manifestasi gas, dan air sumur yang diperoleh dari Pertamina (Lampiran 4).

Geokimia Manifestasi Air Panas

1. Tipe Air Manifestasi

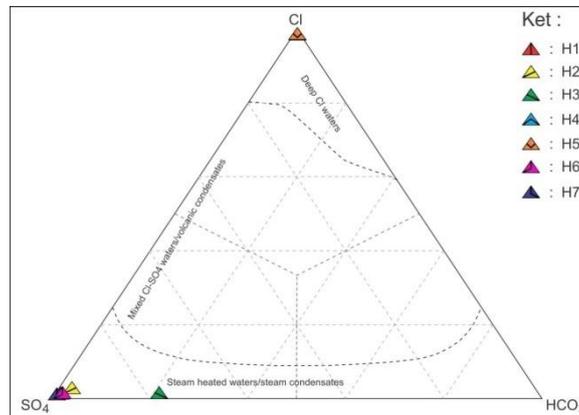
Tipe air panas bumi berdasarkan manifestasi air panas (Gambar 2) terdiri dari :

Kelompok Air Klorida, kelompok air ini terdiri dari sampel dengan kode :

- H4
- H5

Kelompok Air Sulfat *Steam Heated*, kelompok air ini terdiri dari sampel dengan kode :

- H1 - H3 - H7
- H2 - H6



Gambar 2. Tipe air manifestasi berdasarkan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Giggenbach, 1991 dalam Nicholson, 1993)

2. Zonasi Sistem Panas Bumi

Zonasi ini menggunakan rasio Cl/SO₄, rasio Na/K, dan rasio Na/Ca. Rasio Cl/SO₄ (Tabel 3). Berdasarkan pengelompokan tersebut, dapat disimpulkan bahwa kelompok pertama (H4 dan H5) merupakan air panas klorida yang terletak di zona *outflow* karena memiliki nilai rasio Cl/SO₄, Na/K, dan Na/Ca yang tinggi (Nicholson, 1993). Sedangkan kelompok kedua (H1, H2, H3, H6, dan H7) merupakan air sulfat yang terletak di zona *upflow* karena memiliki nilai rasio Cl/SO₄, Na/K, dan Na/Ca yang rendah (Nicholson, 1993).

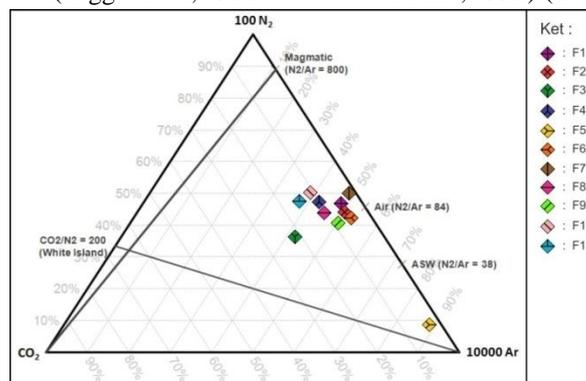
3. Arah Aliran Air Bawah Permukaan

Analisis ini menggunakan rasio Cl/SO₄, rasio Na/K, dan rasio SO₄/HCO₃. Berdasarkan analisis dapat disimpulkan bahwa arah aliran air panas bawah permukaan yaitu dari kelompok pertama (sisi Gn. Lumut) menuju kelompok kedua (kaki Bukit Bunbun) di mana peningkatan nilai rasio Cl/SO₄ dan Na/K serta penurunan nilai rasio SO₄/HCO₃ terjadi dari kelompok pertama menuju kelompok kedua.

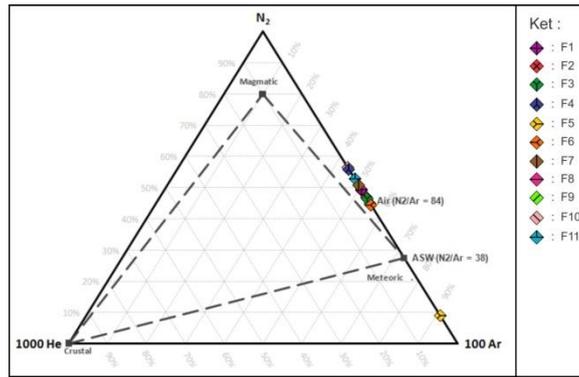
Geokimia Manifestasi Gas

1. Asal Manifestasi Gas

Analisis asal manifestasi gas menunjukkan bahwa gas-gas dalam manifestasi panas bumi Lapangan OKU berasal dari air meteorik berdasarkan diagram segitiga N₂-Ar-CO₂ (Powell dan Cumming, 2010) (Gambar 3) dan diagram segitiga N₂-He-Ar (Giggenbach, 1980 dalam Nicholson, 1993) (Gambar 4).



Gambar 3. Perkiraan asal gas manifestasi fumarol pada sistem panas bumi Lapangan OKU menggunakan diagram segitiga N₂-Ar-CO₂ (Powell dan Cumming, 2010)



Gambar 4. Perkiraan asal gas manifestasi fumarol pada sistem panas bumi Lapangan OKU menggunakan diagram segitiga N₂-He-Ar (Giggenbach, 1980 dalam Nicholson, 1993)

2. Arah Aliran Fluida Bawah Permukaan

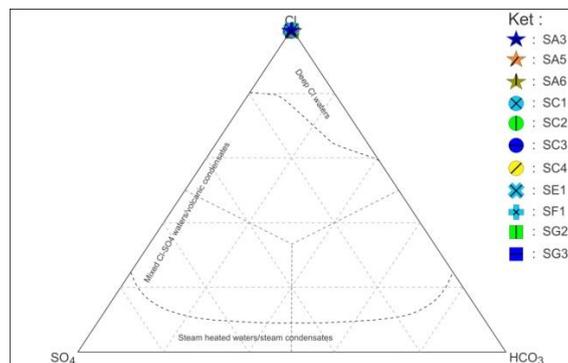
Untuk menentukan arah aliran fluida bawah permukaan menggunakan data gas, maka metode yang digunakan adalah rasio CO₂/H₂S. Hasil analisis menunjukkan bahwa arah aliran fluida bawah permukaan diperkirakan dari kelompok pertama (F11, F9, F1, F3, F2, F7, F4, F6, F8, dan F10) menuju ke kelompok kedua (F5) (Tabel 3).

Tabel 3. Rasio CO₂/H₂S untuk mengindikasikan arah aliran air panas bumi bawah permukaan. Peningkatan nilai rasio mengindikasikan arah aliran (Nicholson, 1993)

Manifestasi	CO ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	Rasio CO ₂ /H ₂ S	Arah Aliran
F11	84,3	9,9	8,51	<i>Upflow</i> <i>Outflow</i>
F9	83,7	9,31	8,99	
F1	81,8	8,81	9,28	
F3	87,8	8,63	10,17	
F2	84,4	6,54	12,90	
F7	78,3	5,21	13,68	
F4	88,7	6,07	14,59	
F6	83,7	5,52	15,16	
F8	89,9	4,43	20,29	
F10	90,3	4,19	21,55	
F5	93,6	2,4	39	

• **Geokimia Air Sumur**

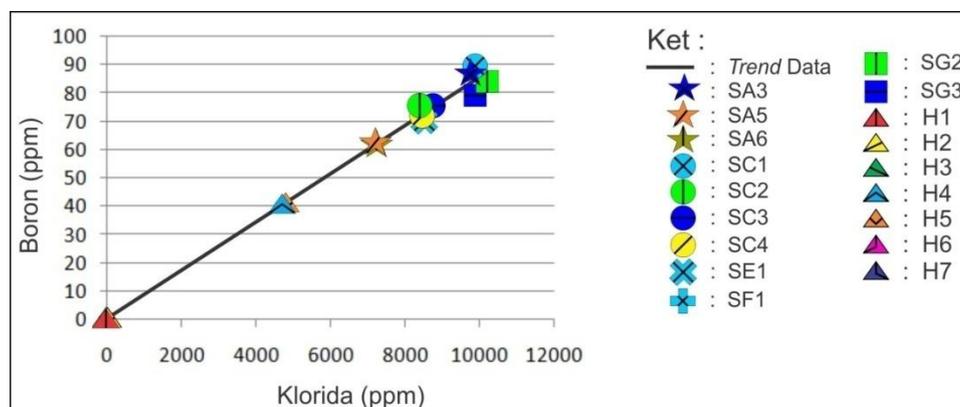
Data-data air sumur terdiri dari data SA3, SA5, SA6, SC1, SC2, SC3, SC4, SE1, SF1, SG2, dan SG3. Data-data tersebut diplot pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 5), sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis air pada semua sumur Lapangan OKU adalah kelompok air klorida.



Gambar 5. Tipe air sumur berdasarkan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Giggenbach, 1991 dalam Nicholson, 1993)

- **Hubungan Air Sumur dan Mata Air Panas**

Untuk mengetahui hubungan air sumur dan mata air panas digunakan grafik Cl vs B. Hasil plot pada grafik Cl/B (Gambar 6) menunjukkan bahwa air sumur dan mata air panas pada Lapangan OKU menunjukkan pola yang sama sehingga dapat diperkirakan bahwa data-data tersebut berasal dari reservoir yang sama.



Gambar 6. Grafik Klorida (Cl) vs Boron (B) yang menunjukkan *trend* yang sama, hal ini mengindikasikan bahwa manifestasi air panas dan air sumur berasal dari sistem panas bumi yang sama

TEMPERATUR RESERVOIR PANAS BUMI LAPANGAN OKU

Temperatur reservoir Lapangan OKU ditentukan menggunakan data unsur kimia air dan gas. Data-data tersebut digunakan untuk perhitungan temperatur menggunakan metode geotermometer untuk masing-masing tipe fluida.

1. Keseimbangan Ion

Untuk menentukan data air yang dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer, maka dilakukan perhitungan keseimbangan ion. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa terdapat tiga data yang memiliki nilai kurang dari 5%, yaitu data H3, H4, dan H5 (Tabel 4), sedangkan seluruh data air sumur dapat digunakan untuk perhitungan metode geotermometer (Tabel 5).

Tabel 4. Keseimbangan ion manifestasi air panas

No	Manifestasi	Tipe Air	Keseimbangan Ion
1	H1	Sulfat	26,72%
2	H2	Sulfat	27,06%
3	H3	Sulfat	4,81%
4	H4	Klorida	0,24%
5	H5	Klorida	0,06%
6	H6	Sulfat	26,69%
7	H7	Sulfat	52,77%

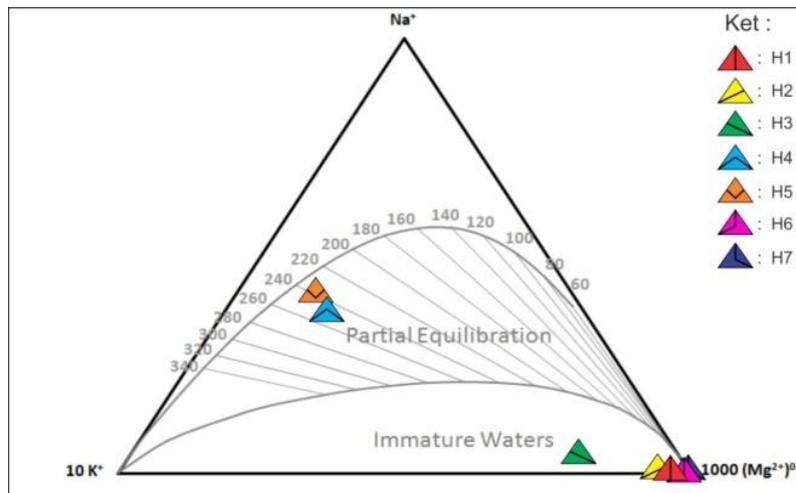
Tabel 5. Keseimbangan ion air sumur

No	Sumur	Tipe Air	Keseimbangan Ion
1	SA3	Klorida	2,02%
2	SA5	Klorida	0,13%
3	SA6	Klorida	0,25%
4	SC1	Klorida	0,53%
5	SC2	Klorida	3,14%
6	SC3	Klorida	1,52%
7	SC4	Klorida	3,59%

8	SE1	Klorida	2,35%
9	SF1	Klorida	3,77%
10	SG2	Klorida	1,32%
11	SG3	Klorida	0,05%

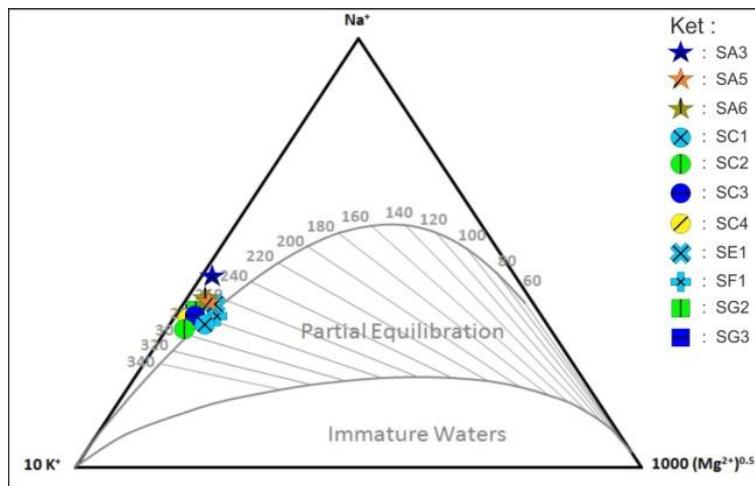
2. Temperatur Reservoir

Penentuan temperatur reservoir yang pertama menggunakan diagram segitiga Na-K-Mg (Giggenbach, 1988 dalam Nicholson, 1993). Dari hasil plot pada diagram tersebut, temperature reservoir berdasarkan data H4 dan H5 adalah 237°C-248°C (Gambar 11), dan temperatur reservoir berdasarkan data air sumur adalah SA3 (249°C), SA5 (267°C), SA6 (265°C), SC1 (286°C), SC2 (296°C), SC3 (281°C), SC4 (285°C), SE1 (266°C), SF1 (275°C), SG2 (276°C), dan SG3 (279°C) (Gambar 7).



Gambar 7. Penentuan temperatur relatif reservoir berdasarkan data manifestasi air panas menggunakan diagram segitiga Na-K-Mg (Giggenbach, 1988 dalam Nicholson, 1993)

Selain menggunakan diagram Na-K-Mg, temperatur reservoir juga diperkirakan menggunakan metode geotermometer Na/K. Hasil perhitungan temperatur berdasarkan data H4 dan H5 menunjukkan nilai temperatur reservoir sebesar 238°-248°C menggunakan rumus Giggenbach (1988) dalam Nicholson (1993), 195°-209°C menggunakan rumus Truesdell (1976) dalam Nicholson (1993), dan 223°-233°C menggunakan rumus Fournier (1979) dalam Nicholson (1993) (Gambar 8).



Gambar 8. Penentuan temperatur reservoir berdasarkan data air sumur menggunakan diagram segitiga Na-K-Mg (Giggenbach, 1988 dalam Nicholson, 1993)

Data gas juga dapat digunakan untuk menentukan temperatur reservoir menggunakan metode geotermometer. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa berdasarkan metode geotermometer H_2S (Arnorsson dan Gunnlaugsson, 1985 dalam Karingithi, 2009) diperoleh nilai 253° - $291^{\circ}C$, berdasarkan geotermometer CO_2/H_2 (Arnorsson dan Gunnlaugsson, 1985 dalam Karingithi, 2009) diperoleh nilai 261° - $299^{\circ}C$, berdasarkan geotermometer H_2S/H_2 (Arnorsson dan Gunnlaugsson, 1985 dalam Karingithi, 2009) diperoleh nilai 232° - $289^{\circ}C$, dan berdasarkan geotermometer $CO_2-H_2S-H_2-CH_4$ (D'Amore dan Panichi, 1980 dalam Nicholson, 1993) diperoleh nilai 209° - $297^{\circ}C$.

MODEL KONSEPTUAL PANAS BUMI LAPANGAN "OKU"

Sistem panas bumi terdiri dari komponen-komponen seperti zona penudung, zona reservoir, fluida reservoir, temperatur reservoir, sumber panas, manifestasi panas bumi, zona *upflow*, zona *outflow*, dan zona imbuhan (*recharge*) (Gambar 9).

- **Zona Penudung (*Cap Zone*)**

Zona penudung di sistem panas bumi Lapangan OKU disusun oleh mineral-mineral lempung hidrotermal yang termasuk ke dalam zona alterasi argilik dan subpropilitik. Mineral-mineral tersebut adalah smektit, illit, klorit, illit-smektit, dan klorit-smektit.

- **Zona Reservoir**

Zona reservoir di sistem panas bumi Lapangan OKU disusun oleh mineral-mineral lempung hidrotermal yang terbentuk pada temperatur tinggi dan pH netral. Mineral-mineral yang memiliki karakter tersebut adalah epidot, adularia, dan klorit dan tergabung dalam kelompok zona propilitik.

Mineral-mineral tersebut berkaitan dengan jenis air di reservoir. Hasil analisis geokimia air sumur menunjukkan bahwa air reservoir adalah air klorida.

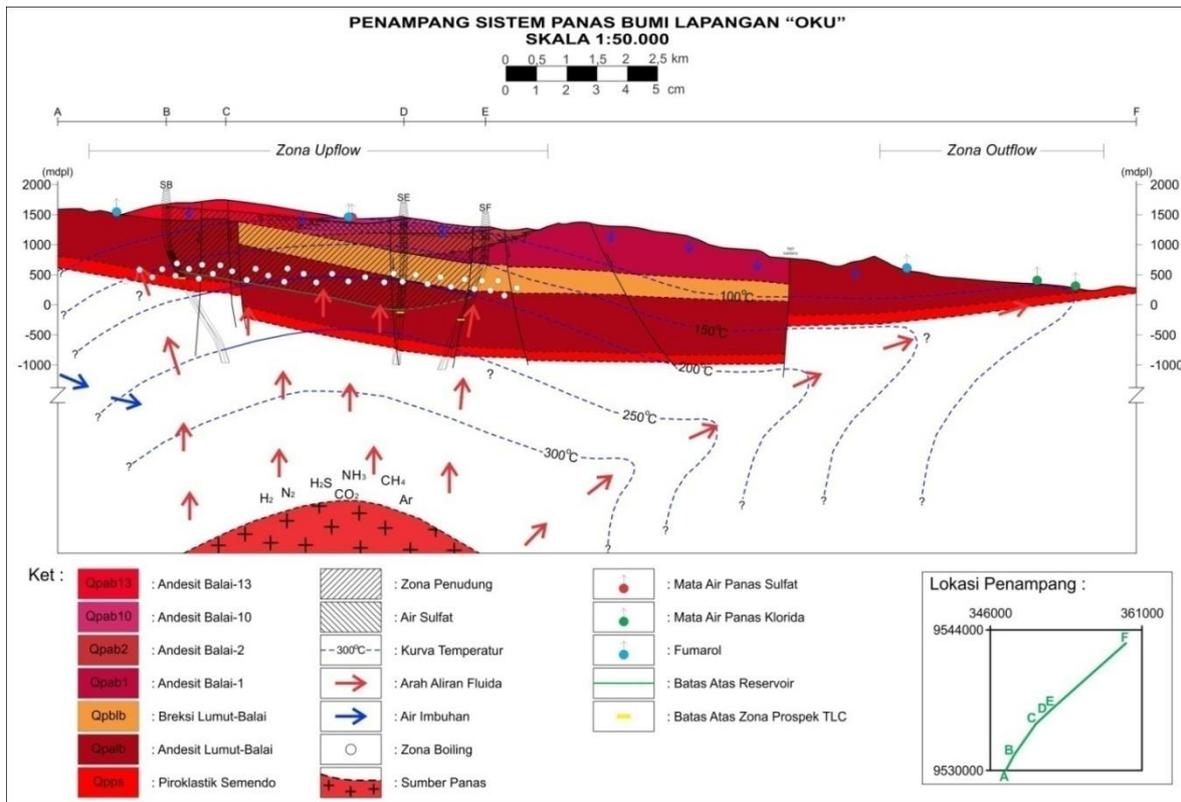
Fluida reservoir panas bumi dapat ditentukan berdasarkan analisis geokimia pada manifestasi di permukaan dan air sumur seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Analisis geokimia tersebut menghasilkan jenis-jenis fluida air yang dapat memberikan gambaran tentang jenis fluida di kedalaman. Jenis fluida reservoir berkaitan dengan zona reservoir itu sendiri. Batas atas zona reservoir yang rata-rata terletak di kedalaman yang besar dan juga pengambilan sampel air sumur pada kedalaman yang besar memberikan gambaran bahwa jenis air sumur merupakan jenis air pada reservoir. Dari hasil analisis geokimia air sumur, dapat disimpulkan bahwa jenis air reservoir Lapangan OKU adalah air klorida. Penentuan tersebut berdasarkan data kimia air dari sumur SA3, SA5, SA6, SC1, SC2, SC3, SC4, SE1, SF1, SG2, dan SG3. Air klorida pada reservoir tersebut mengalir di kedalaman dari sisi timurlaut Gunung Lumut menuju kaki Bukit Bunbun hingga membentuk zona keluaran pada sistem panas bumi (*outflow*). Berdasarkan data kimia air sumur, air klorida pada reservoir tersebut memiliki derajat keasaman yang mendekati netral hingga netral (pH~7 dari semua sampel air sumur). Air reservoir tersebut mengandung ion klorida yang tinggi (7.212,14-10.192,12 ppm) dan diikuti oleh ion natrium (4.143,54-5664 ppm) dan ion kalium (600,57-951,42 ppm), sedangkan ion-ion lainnya memiliki konsentrasi yang kecil pada air tersebut. Berdasarkan hal tersebut, dapat diperkirakan bahwa ion klorida, natrium, dan kalium memiliki kaitan dalam bentuk senyawa yang mendominasi air panas bumi tersebut. Senyawa tersebut diperkirakan berupa NaCl (natrium klorida) dan KCl (kalium klorida).

Air reservoir yang disusun oleh air klorida memberikan dampak terhadap batuan di reservoir yang berubah menjadi mineral ubahan dengan tipe ubahan mineral berjenis netral. Hal tersebut terlihat pada sumur-sumur Lapangan OKU. Di reservoir lapangan ini dijumpai mineral-mineral yang terbentuk pada pH netral jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Izawa (1993), dan Corbett dan Leach (1997), dan terbentuk pada temperatur tinggi jika dibandingkan dengan standar mineral ubahan menurut Reyes (2000). Mineral-mineral tersebut adalah epidot, klorit, dan adularia. Ketiga mineral tersebut merupakan penciri kondisi reservoir dengan memperkuat indikasi bahwa reservoir lapangan ini disusun oleh air dengan pH netral dan bertemperatur tinggi. Hal tersebut juga didukung kuat oleh perhitungan temperatur reservoir menggunakan data unsur kimia air sumur yang memberikan gambaran fluida reservoir memiliki kisaran temperatur $248^{\circ}C$ - $294^{\circ}C$. Kedua hal di atas memberikan kesimpulan bahwa reservoir lapangan ini disusun oleh air panas dengan temperatur $248^{\circ}C$ - $294^{\circ}C$ berdasarkan perhitungan menggunakan metode geotermometer dan $>200^{\circ}C$ berdasarkan data himpunan mineral ubahan. Dengan nilai temperatur tersebut, sistem panas bumi Lapangan OKU termasuk ke dalam sistem panas bumi bertemperatur tinggi.

- **Sumber Panas**

Sumber panas (*heat source*) sistem panas bumi merupakan sumber panas yang memberikan panas kepada reservoir baik melalui mekanisme konduksi maupun konveksi. Sumber panas pada Lapangan OKU diperkirakan merupakan tubuh intrusi (tubuh magma) yang turut mengontrol keberadaan batuan-batuan vulkanik yang berada di lapangan ini. Pada penampang sistem panas bumi (Gambar 13), sumber panas ditunjukkan oleh tubuh intrusi yang diperkirakan berada di sebelah timur dari Gn. Lumut, atau tepatnya berada di bawah sumur SB1, SE1, dan SF1 namun kedalaman dari sumber panas ini tidak diketahui secara pasti.

Keberadaan intrusi di lokasi tersebut diperkirakan berdasarkan keterdapatan struktur *upflow* di sekitar sumur-sumur tersebut. Keberadaan struktur *upflow* menjadi parameter penting dalam menentukan keberadaan sumber panas tersebut. Hal tersebut juga didukung oleh ditemukannya beberapa fumarol F3, F7, dan F9 di sekitar sumur SB1, SE1, dan SF1. Selain di lokasi tersebut, sumber panas juga diperkirakan menyebar hingga sisi timurlaut Gn. Lumut, atau tepatnya di sekitar lokasi sumur SA7. Di sekitar lokasi tersebut terdapat satuan andesit Panindayan (Qpap) yang merupakan salah satu satuan batuan termuda di lapangan ini, dan terdapat fumarol F1, F2, dan F8 di lokasi ini. Kedua aspek tersebut merupakan penciri bahwa di bawah permukaan terdapat tubuh intrusi (tubuh magma) yang merupakan sumber panas dari sistem di lapangan ini karena gas-gas yang terkandung dalam fumarol mengindikasikan gas yang berasal dari magma (terutama CO₂ dan H₂S).



Gambar 9. Model konseptual sistem panas bumi Lapangan OKU pada penampang A-F

KESIMPULAN

Lapangan Panas Bumi “OKU” yang terletak di Provinsi Sumatera Selatan tersusun dari batuan-batuan vulkanik berumur Kuartar yang terdiri dari 19 satuan batuan dan terbagi ke dalam fase pre-kaldera, kaldera, dan post-kaldera dengan delapan satuan di antaranya terdapat dalam sumur-sumur lapangan ini. Kaldera Lumut-Balai diperkirakan terbentuk sebelum 1 juta tahun yang lalu, dengan satuan tertua setelah kaldera terbentuk berumur 0,9 juta tahun yang merupakan kelompok post-kaldera. Kelompok inilah yang diperkirakan menjadi sumber panas dari sistem panas bumi lapangan ini.

Di lapangan ini terdapat zona sistem berupa zona *upflow* yang terletak di sisi timurlaut Gn. Lumut dan *outflow* di kaki Bukit Bunbun. Zona *upflow* dicirikan oleh manifestasi air panas sulfat, sedangkan zona *outflow* dicirikan oleh manifestasi air panas klorida sehingga mencerminkan tatanan sistem panas bumi berelief tinggi. Manifestasi fumarol juga ditemukan di sekitar manifestasi air panas sulfat sehingga mendukung lokasi zona *upflow*. Air sulfat diperkirakan berasal dari air tanah di bawah permukaan yang terpanaskan oleh gas magmatik (H₂S). Sedangkan air klorida diperkirakan berasal dari reservoir panas bumi lapangan ini. Hal tersebut didukung oleh data air sumur yang berupa air klorida.

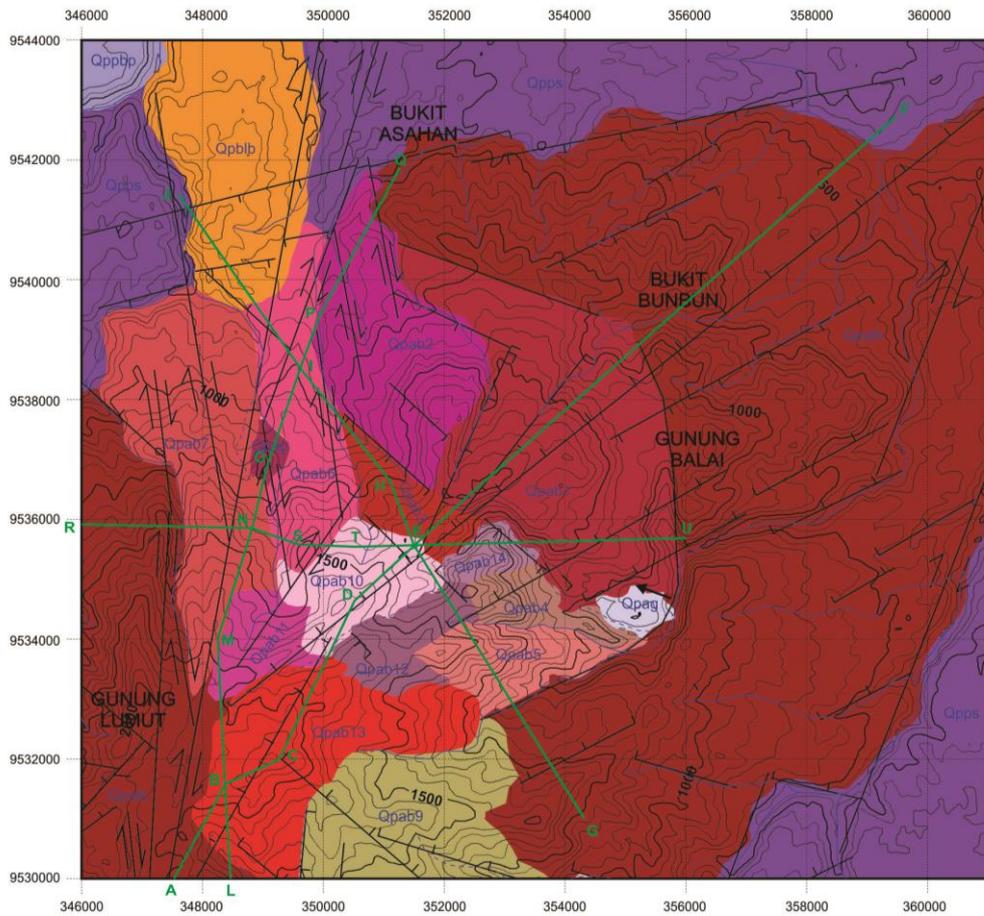
Batuan-batuan di sumur-sumur lapangan ini hampir seluruhnya teralterasi menjadi argilik, subpropilitik, dan propilitik. Zona argilik tersusun atas mineral smektit serta kalsit, oksida besi, dan pirit dengan perkiraan temperatur terbentuknya 30-150°C. Zona subpropilitik tersusun dari mineral klorit, illit, illit-smektit, klorit-smektit, kuarsa sekunder, dan kalsit dengan perkiraan temperatur terbentuknya 175-230°C. Zona propilitik

tersusun dari mineral epidot, klorit, kuarsa sekunder, adularia, dan kalsit dengan perkiraan terbentuknya 200-330°C.

Sistem panas bumi Lapangan OKU termasuk ke dalam sistem panas bumi bertemperatur tinggi karena memiliki temperatur reservoir sebesar 248°-294°C berdasarkan perhitungan temperatur menggunakan metode geotermometer. Adanya sistem panas bumi didukung oleh komponen-komponen seperti zona penudung yang tersusun dari zona mineral ubahan argilik dan subpropilitik karena kedua zona ini disusun oleh mineral-mineral lempung sehingga berfungsi sebagai penudung air dan gas. Zona reservoir dicirikan oleh zona propilitik karena terbentuk pada temperatur yang tinggi. Reservoir lapangan ini diisi oleh air klorida yang bergerak ke permukaan secara langsung (vertikal) di sisi timurlaut Gn. Lumut dan bergerak secara lateral ke timurlaut menuju Bukit Bunbun dan keluar sebagai manifestasi di kaki Bukit Bunbun. Gas magmatik yang bergerak ke permukaan memanaskan air tanah yang lebih dangkal dari reservoir membentuk air sulfat. Sumber panas dari sistem ini diperkirakan berupa tubuh intrusi (tubuh magma) yang tidak diketahui kedalamannya namun diperkirakan terletak di bawah sisi timurlaut Gn. Lumut (di zona *upflow*).

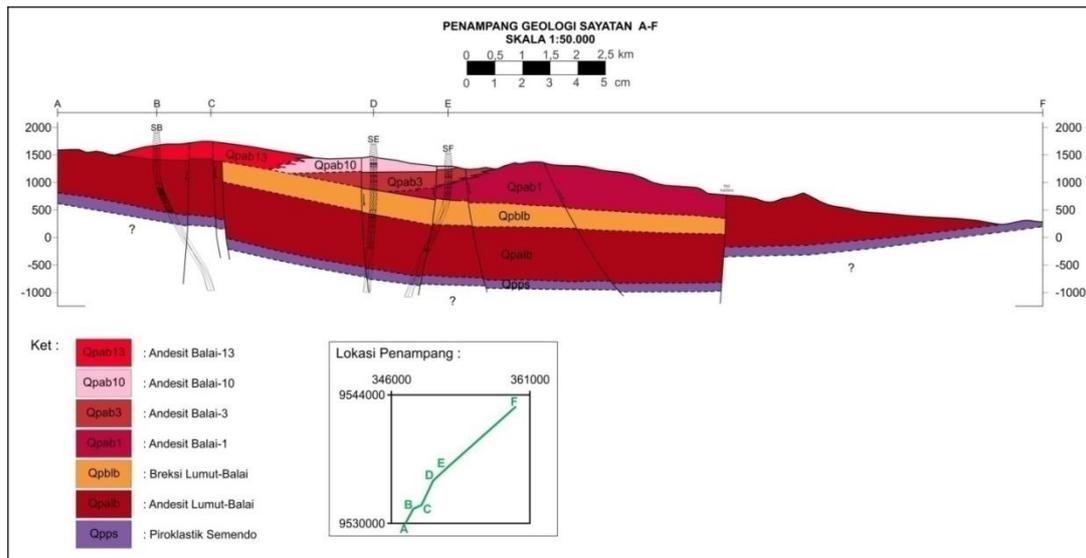
DAFTAR PUSTAKA

- Barber, A.J., Crow, M.J., and Milsom, J.S., 2005, *Sumatra : Geology, Resources and Tectonics Evolution*, The Geological Society Publishing House, London, 3-4, 93-99
- Corbett, G.J, and Leach, T.M., 1997, *South West Pacific Rim Gold and Copper System : Structure, Alteration and Mineralization*, CMS New Zealand Hd Auckland, New Zealand, 68-75
- Darman, H., dan Sidi, F.H., 2000. *An Outline of the Geology of Indonesia*. Indonesian Association of Geologists, Jakarta.
- Gafoer, S., Amin, T.C., Pardede, R., 1993, Peta Geologi Lembar Baturaja (Sumatera), Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Hamilton, W., 1979, *Tectonics of the Indonesian Region*, United States Government Printing Office, Washington, 32-38
- Hochstein, M.P., and Browne P.R.L., 2000, *Surface Manifestations of Geothermal Systems With Volcanic Heat Source*, Encyclopedia of Volcanoes, San Diego, 835
- Izawa, E., 1993, Hydrothermal Alteration in Geothermal System, Departement of Mining Kyushu University.
- Karingithi, C.W., 2009, *Chemical Geothermometers For Geothermal Exploration*, Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, Kenya, 3-9
- Natawidjaja, D.H., and Triyoso, W., 2007, *The Sumatran Fault Zone – From Source to Hazard*, Journal of Earthquake and Tsunami, Vol.1 no.1, 21-47
- Nicholson, Keith., 1993, *Geothermal Fluids : Chemistry and Explroration Techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1-114, 200-205
- Powell, T., and Cumming, W., 2010, *Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry*, Proceedings : Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, California,
- Pulunggono, A., Agus, H.S., Kosuma, C.G., 1992, *Pre-Tertiary and Tertiary Fault System as a Framework of the South Sumatra Basin; A Study of SAR-Maps*, Proceeding : IPA 21st Annual Convention, Vol 1. 339-360
- Reyes, A.G., 2000, *Petrology and Mineral Alteration in Hydrothermal Systems : From Diagenesis to Volcanic Catastrophes*, Geothermal Training Programme, New Zealand, 7-16
- Sieh, K., and Natawidjaja, D., 2000, *Neotectonic of Sumatran Fault, Indonesia*, Geophysical Research, Vol. 105 no. B12, 28295-28326

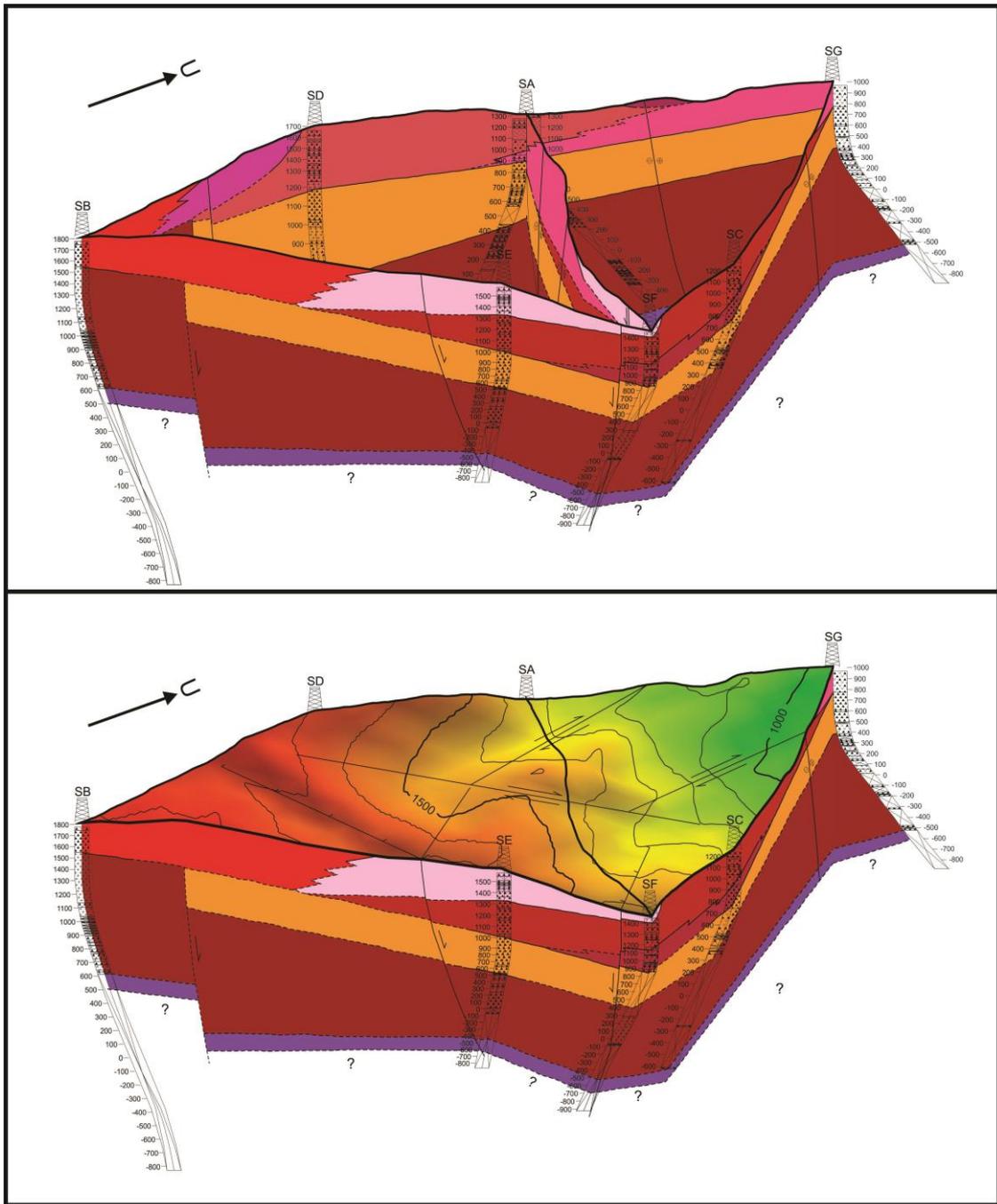


UMUR RELATIF		UMUR ABSOLUT (JUTA TAHUN)	SATUAN VULKANOSTRATIGRAFI		WARNA SATUAN					
ZAMAN	KALA		KHULUK	GUMUK						
Kuartar	Plistosen	0,9	Post-Kaldera	Kompleks Pegunungan Balai Muda	Qpap	Qpag				
					Qpab10	Qpab11	Qpab12	Qpab13	Qpab14	
					Qpab6	Qpab7	Qpab9			
					Qpab2	Qpab3	Qpab4	Qpab5		
					Qpab1					
		1,0	Kaldera	Kaldera Lumut-Balai	Qpblb					
		1,2	Pre-Kaldera	Gn. Lumut dan G. Balai	Qpalb					
	1,5	Bukit Pandan			Qppbp					
	1,8				Qpps					

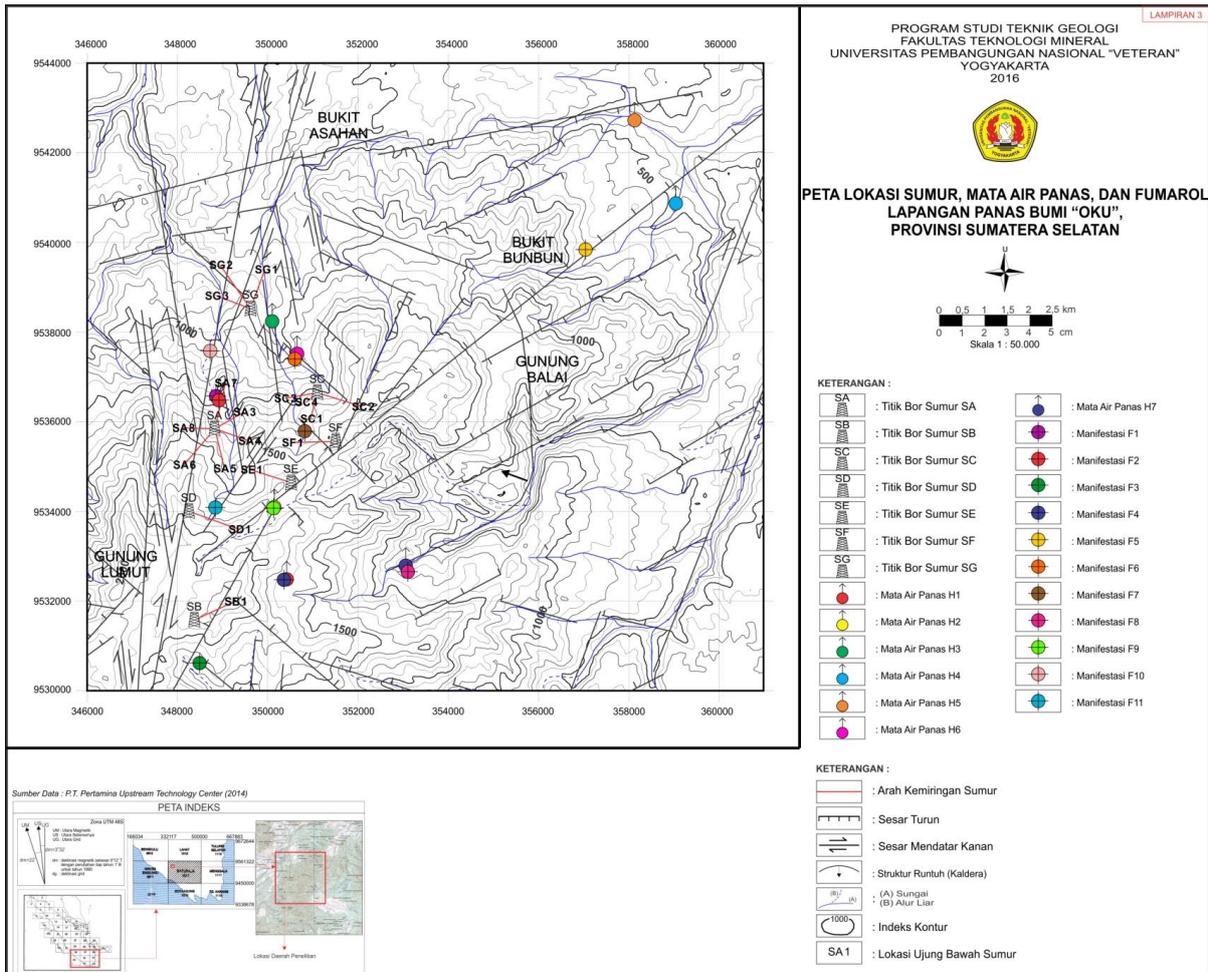
Lampiran 1. Modifikasi dari Peta Geologi Daerah Lumut-Balai oleh PGE (2014)



Lampiran 2. Penampang geologi sayatan A-F di area panas bumi Lapangan OKU



Lapiran 3. Penampang geologi 3 dimensi Lapangan Lumut-Balai menggunakan data sumur SA4, SA5, SA7, SA8, SB1 SC1, SD1, SE1, SF1, SG1, dan SG2



Lampiran 4. Peta Lokasi Sumur, Mata Air Panas, dan Fumarol