

SISTEM PANAS BUMI DAERAH KALAWAT, KABUPATEN MINAHASA UTARA, PROVINSI SULAWESI UTARA

Riza Asyari Yamin¹, Aton Patonah², Adi Hardiyono², Muhammad Nur Hadi³

¹ Mahasiswa S1- Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran,

² Laboratorium Petrologi dan Mineral Universitas Padjadjaran,

³ Pusat Sumber Daya Geologi

ABSTRACT

Kalwat Geothermal Field administratively is located in North Minahasa District, North Sulawesi Province. Lithologies of this research area divided by pyroclastic flows and lava. The heat source of this location comes from Mahawu Mountain that located in the southwest outside the research area. Lithology which acts as the cap rock layer is form by pyroclastic flow that has clay minerals which impermeable. Based on petrographic and PIMA analysis, the alteration minerals that arise are dominated by montmorillonite and halloysite, so the alteration type of this research area is argillic type and located at the northwest and southwest of research area. The water type that appears are dilute chloride-bicarbonate type and bicarbonate type. Based on the calculation of paleotemperature and geothermometer, there is increase of temperature during the form of mineral and the recent temperature. This is due to increased of volcanic activity in the research area. This research area is water-dominated and moderate temperature system that has range of temperature at 209-210⁰ C.

Keywords: Geothermal, Kalawat, alteration, argillic, hot spring, paleotemperature

ABSTRAK

Lapangan Panasbumi Kalawat secara administratif termasuk ke dalam Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara. Litologi penyusun pada daerah penelitian terdiri dari aliran piroklastik dan lava. Sumber panas pada daerah ini berasal dari Gunung Mahawu yang berada di sebelah barat daya di luar lokasi penelitian. Litologi yang bertindak sebagai lapisan penutuping berupa aliran piroklastik yang di dalamnya terdapat mineral lempung yang *impermeable*. Berdasarkan analisis petrografi dan PIMA, mineral ubahan yang muncul yaitu didominasi *montmorillonite* dan *halloysite*, sehingga tipe alterasi yang berkembang pada daerah penelitian adalah tipe alterasi argilik dan terletak di sebelah barat laut dan barat daya pada daerah penelitian. Tipe air yang muncul yaitu tipe *dilute* klorida-bikarbonat dan bikarbonat. Berdasarkan perhitungan paleotemperatur dan geotermometer, terjadi kenaikan suhu saat pembentukan mineral dengan suhu sekarang. Hal ini dikarenakan meningkatnya aktivitas vulkanik di daerah penelitian. Daerah penelitian termasuk ke dalam sistem panas bumi *water dominated* dan sistem panas bumi temperatur sedang dengan suhu 209-210⁰C.

Kata kunci: Panasbumi, Kalawat, Alterasi, argilik, air panas, Paleotemperatur

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang terletak pada pertemuan dua lempeng yang saling bertumbukan sehingga menyebabkan terbentuknya gugusan gunungapi yang berjajar sepanjang batas pertemuan dua lempeng tersebut. Melimpahnya gunungapi aktif di Indonesia ini membuat Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang saat ini sedang naik daun, yaitu panasbumi.

Energi panasbumi merupakan sumber energi terbarukan berupa energi *thermal* (panas) yang dihasilkan dan disimpan di dalam bumi. Panas yang terkandung di bawah kerak bumi ini bertambah seiring dengan kedalaman yang semakin dalam.

Selain merupakan sumber energi yang terbarukan, energi panasbumi juga menjadi energi yang relatif lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan energi hasil bahan bakar fosil.

Sulawesi Utara adalah salah satu provinsi dengan pertumbuhan pelanggan listrik yang tinggi sekitar 60.000 pelanggan baru. Sulawesi Utara juga memiliki pertumbuhan konsumsi listrik hingga 15% (*pln.co.id*). Jika pertumbuhan konsumsi listrik ini terus berkembang maka daya energi yang ada saat ini tidak akan mampu memenuhi permintaan konsumen akan kebutuhan listrik. Namun, permasalahan ini kemungkinan dapat teratasi karena Provinsi Sulawesi Utara memiliki jumlah gunung api aktif yang me-

limpah sehingga berpotensi untuk dilakukan pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP) yang nantinya dapat mengatasi masalah pasokan listrik di sana.

Salah satu daerah yang memiliki potensi untuk pengembangan proyek panas bumi ini terletak di daerah Kalawat, Kabupaten Minahasa Utara (gambar 1). Berdasarkan survey pendahuluan yang dilakukan oleh Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) pada tahun 2013, di lokasi ini ditemukan dua manifestasi berupa sumber mata air panas yang terletak di daerah Kaleosan. Dengan adanya manifestasi ini, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dan terperinci untuk mengetahui sistem panas bumi dan seberapa besar potensi energi panas bumi di daerah ini.

Secara regional, daerah penelitian berada pada daerah aktif margin dari Lempeng Eurasia yang mengalami empat aktivitas tektonik utama, yaitu pada pertengahan Zaman Kapur, Oligosen Akhir, Miosen Tengah, dan pertengahan Pliosen yang masing-masing berhubungan dengan perkembangan 3 blok (Blok Banda, Blok Tukang Besi, dan Blok Banggai Sula) terhadap daerah aktif margin dari bagian timur Lempeng Eurasia (Villeneuve, dkk., 2001). Aktivitas tektonik utama yang berhubungan dengan daerah penyelidikan adalah aktivitas tektonik yang terjadi pada Kala Oligosen, yaitu berupa peristiwa tumbukan (*collision*) antara blok dari bagian Lempeng Eurasia dengan Blok Banda yang ada di bagian selatannya (Gambar 2).

Berdasarkan Effendi dan Bawono (1997), stratigrafi regional di daerah penelitian terdiri dari dua satuan batuan yaitu Satuan Tufa Tondano (Qtv) dan Batuan Gunungapi Muda (Qv). Secara umum batuan penyusun pada daerah penelitian disusun oleh batuan vulkanik dengan umur Kuartar.

Tujuan dari penelitian ini yaitu : Mengetahui jenis batuan yang ada di lokasi penelitian dan mengetahui persebarannya; Mengetahui tipe alterasi apa saja yang berkembang di daerah

penelitian dengan analisis petrografi dan PIMA; Mengetahui zonasi alterasi mineral daerah penelitian; Mengetahui karakteristik, tipe air, dan asal air panas pada sistem hidrotermal di daerah penelitian berdasarkan analisis geokimia; Menentukan temperatur bawah permukaan di lokasi penelitian; Menentukan sistem panasbumi yang terdapat di daerah penelitian.

METODE PENELITIAN

Penelitian terdiri atas pengumpulan data primer berupa pemetaan geologi dan pengambilan sampel batuan, analisis petrografi dan *PIMA*, dan analisis Geokimia

HASIL PENELITIAN

Stratigrafi

Terdapat berbagai macam jenis batuan yang ada di lokasi penelitian. Berbagai macam batuan tersebut dikelompokkan berdasarkan kesamaan karakteristik dan tekstur sehingga dapat dipisahkan ke dalam beberapa satuan. Pengelompokan yang dilakukan menggunakan satuan yang tidak resmi. Penentuan batas satuan batuan yang ada di lokasi penelitian ini didasarkan pada kondisi topografi dan analisis kontur pada peta. Stratigrafi daerah penelitian terdiri dari tujuh satuan dengan urutan dari tua ke muda yaitu Produk Kaldera Tondano, Lava Pinandaan, Aliran Piroklastik Tingtingon, Lava Klabat 2, Lava Klabat 3, Aliran Piroklastik Klabat 1, Aliran Piroklastik Klabat 2 (gambar 3).

Produk Kaldera Tondano

Ciri fisik endapan piroklastik produk Kaldera Tondano ini terdiri atas batuapung putih, kuning sampai coklat. Butiran batuapung berukuran 2 cm – 40 cm mendominasi endapan ini, sedangkan butiran litik dari basalt dan obsidian. Singkapan batuan ini mudah sekali dijumpai di tepi-tepi jalan sekitar kota Manado dan Bitung. Satuan ini merupakan satuan tempat

munculnya manifestasi air panas dan mineral ubahan yang paling intens.

Lava Pinandaan

Satuan ini tersebar di bagian selatan dari tubuh vulkanik Klabat. Karakteristik dari satuan ini berupa lava andesit dengan tekstur porfiritik, tersusun oleh mineral plagioklas dan piroksen, membentuk struktur lava berlembar dan sebagian massif. Di bagian atasnya tertindih oleh aliran piroklastik dengan komponen lava andesit berwarna abu-abu kehitaman, dengan matrik tufa dan debu vulkanik.

Aliran Piroklastik Tingtingon

Satuan ini tersebar di bagian barat daya daerah penelitian, berbatasan dengan produk vulkanik Mahawu yang berada di luar areal survei. Kenampakan di lapangan berupa aliran piroklastik berwarna abu-abu kemerahan, tersusun oleh komponen lava dasitik dan matrik berupa tufa halus kemerahan. Telah mengalami alterasi yang cukup kuat sehingga mengubah komposisi mineral dari plagioklas dan mineral mafiknya, namun masih nampak mineral kuarsa dan vesikular. Satuan ini menindih produk vulkanik Tondano dan ditindih oleh produk Mahawu.

Lava Klabat 2

Aliran lava pembentuk satuan ini tersebar sangat luas di lereng barat Gunung Klabat. Ciri fisik lava ini berjenis andesit, abu-abu cerah, porfiritik dengan fenokris dominan plagioklas dan piroksen, tertanam dalam masa dasar berbutir halus, mengandung butiran mineral hitam halus. Mineral pembentuk lava ini umumnya lebih kasar dan menonjol dari masadasarnya.

Lava Klabat 3

Aliran lava pembentuk satuan KL-3 ini mengalir ke lereng barat dari kawah pusat. Satuan ini menindih Lava KL-2. Bagian permukaannya berbongkah, sedangkan bagian yang masif terdapat di bagian tengah lelerannya. Ciri fisik lava ini berjenis andesit, vesikuler halus merata,

porfiritik dengan fenokris plagioklas dan piroksen berbutir kasar, tertanam dalam masa dasar berbutir halus, mengandung mineral opak halus.

Aliran Piroklastik Klabat 1

Endapan aliran piroklastik pembentuk satuan KAp1 ini melampar ke arah barat, menutupi endapan lava KL-1, mengalir ke arah barat. Singkapan cukup baik dijumpai di tepi jalan raya baru sekitar Matungkas. Ciri fisik endapan Kap1 berupa material lepas berbagai ukuran dari abu, pasir hingga bongkahan, terpilah buruk, berwarna merah sampai coklat, bongkahan (bom vulkanik) yang ditemukan berdiameter sampai 40 cm.

Aliran Piroklastik Klabat 2

Endapan aliran piroklastik pembentuk satuan Kap2 ini melampar ke arah selatan, mengalir ke arah kota Treman dan Kauditan. Ciri fisik endapan Kap2 berupa material lepas berbagai ukuran dari abu, pasir hingga bongkahan, terpilah buruk, berwarna coklat, bongkahan (bom vulkanik) yang ditemukan berdiameter sampai 20 cm bercampur antara bom skoria dengan bongkahan material lama, belum mengalami pelapukan berarti.

Penentuan tipe alterasi

Penentuan tipe alterasi mineral didapat berdasarkan hasil dari analisis petrografi dan analisis PIMA (Tabel 1). Dari hasil analisis didapatkan mineral sekunder utama dan penyebarannya digunakan untuk menentukan tipe alterasi. Mineral-mineral sekunder yang dominan muncul yaitu mineral lempung berupa *montmorillonite* dan *halloysite*. Dari keterdapatannya mineral tersebut maka disimpulkan bahwa tipe alterasi yang ada di daerah penelitian adalah tipe alterasi argilik.

Persebaran alterasi

Tipe alterasi yang muncul pada daerah penelitian adalah tipe alterasi argilik dengan munculnya mineral *montmorillonite* dan *halloysite*. Mine-

ral-mineral tersebut didapatkan dari hasil pengambilan sampel batuan yang ada di sekitar manifestasi air panas. Berdasarkan hasil analisis petrografi dan PIMA, maka daerah yang terkena alterasi tipe ini berada di sebelah barat laut dan barat daya dari lokasi penelitian.

Geokimia air panas

Selain manifestasi berupa batuan yang berubah, terdapat pula manifestasi berupa mata air panas. Mata air panas yang muncul pada daerah penelitian terdapat di tujuh titik dan memiliki karakteristik masing-masing dan kandungan kimia yang bermacam-macam (Tabel 2 dan 3).

Tipe Air Panas

Penentuan tipe air ini didasarkan kandungan Cl, SO₄, dan HCO₃ yang diplot pada diagram segitiga Nicholson (1993). Dari ketujuh mata air panas yang terdapat di daerah penelitian, terdapat dua macam tipe air panas yaitu tipe *dilute* klorida-bikarbonat dan tipe bikarbonat (Tabel 4 dan Gambar 4):

a) Tipe Air Dilute Klorida-bikarbonat: Tipe air ini terletak di sebelah barat laut pada lokasi penelitian. Mata air panas yang termasuk ke dalam tipe ini yaitu Air Panas Kaleosan 1-4 dan Air Panas Sampiri 2. Tipe Air panas ini memiliki kandungan Cl yang lebih besar dibandingkan SO₄ maupun HCO₃. Pada salah satu sampel air panas, tepatnya pada APK 3 ditemukan pula endapan silika sinter, dan pada APK 4 terdapat *travertine*. Tipe air ini menunjukkan adanya interaksi antara air klorida dengan air tanah yang bersifat bikarbonat pada saat menuju ke permukaan, namun masih didominasi oleh fluida panas yang berasal langsung dari kedalaman. Pada mata air panas Sampiri 2 (APS 2) nilai HCO₃ lebih besar dibandingkan dengan nilai SO₄ maupun Cl, yang menunjukkan adanya interaksi relatif tinggi antara air dari kedalaman dengan air meteorik. b) Tipe Air bikarbonat: Tipe air ini memiliki kandungan HCO₃ yang lebih

tinggi dibandingkan Cl dan SO₄. Tipe air ini memiliki pH mendekati netral (7,12-7,3) dan menunjukkan adanya interaksi yang intensif antara fluida panas dengan air meteorik. Mata air panas yang termasuk ke dalam tipe ini yaitu Air Panas Sampiri 1 dan Air Panas Sawangan.

Lingkungan Air Panas

Lingkungan air panas dapat diketahui jika kita sudah mendapat hasil analisis mengenai kandungan beberapa unsur antara lain klorida (Cl), Litium (Li), dan Boron (B). setelah itu dilakukan *plotting* terhadap tiga unsur kimia tersebut pada diagram Giggenbach (1991). Berdasarkan kandungan kimia air dan hasil plot pada diagram Cl-Li B maka lingkungan air panas pada daerah penelitian berada pada lingkungan vulkanik magmatik (Tabel 5 dan Gambar 5). Tingginya kandungan Cl yang melebihi 50% menunjukkan air panas daerah Kalawat berasal dari proses vulkanik magmatic yang membawa banyak gas HCl dan H₂S terlarut (Nicholson, 1993).

Asal Air Panas

Berdasarkan hasil perhitungan terhadap kandungan Na/1000, K/100, dan $\sqrt{\text{Mg}}$, terlihat bahwa kandungan Magnesium pada sampel air panas daerah Kalawat lebih dominan dibandingkan kandungan Natrium maupun Kalium (Tabel 6). Dengan tingginya kandungan Mg, maka dapat dikatakan bahwa terjadi reaksi antara fluida dari sistem panas bumi dengan batuan samping yang menyebabkan terbawanya kandungan Mg dari batuan sekitar ke dalam fluida tersebut, ataupun terjadi interaksi antara fluida tersebut dengan air bawah permukaan.

Dari hasil *plotting* terhadap diagram Na-K-Mg (Giggenbach, 1988) terlihat bahwa hampir seluruh sampel air panas Kaleosan berada di perbatasan zona *partial equilibrium* dan *immature water*, sedangkan air panas Sampiri dan Sawangan berada pada zona *immature water* (gambar 6). Air panas Kaleosan berasal langsung dari

kedalaman, namun memiliki pencampuran dengan air meteorik meskipun tidak terlalu intensif. Sedangkan air panas Sawangan dan Sampiri didominasi oleh pencampuran fluida panas dengan air meteorik.

Paleotemperatur

Analisis terhadap mineral ubahan yang terdapat pada daerah penelitian dilakukan untuk mengetahui apa saja mineral ubahan yang terdapat pada daerah penelitian, mengetahui tipe alterasi apa saja yang berkembang, dan juga untuk mengetahui temperatur pembentukannya. Oleh karena itu dilakukan penarikan paleotemperatur di mana mineral-mineral ubahan terbentuk dalam fluida melalui Tabel paleotemperatur stabilitas mineral (Reyes, 1990 dalam Browne, 1996). Telah disebutkan sebelumnya bahwa mineral ubahan yang muncul pada lapangan ini yaitu didominasi oleh *montmorillonite* dan *halloysite*, serta *illite* dan *kaolinite* (Tabel 7).

Berdasarkan temperatur pembentukan mineral tersebut, terlihat bahwa terdapat irisan antara mineral ilit dan kaolin pada suhu 200 °C. Ini merupakan tahap awal pembentukan mineral pada daerah penelitian. Mineral tersebut memiliki pH yang relatif asam, sehingga kemungkinan pada masa tersebut sedang terjadi aktivitas vulkanik di daerah penelitian. Namun, kemunculan mineral monmorilonit dan halosit pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa aktivitas vulkanik di daerah tersebut berangsur menurun, serta adanya pengaruh yang besar dari air meteorik yang mengakibatkan temperatur menurun dan pH mendekati netral. Dengan demikian, temperatur bawah permukaan pada saat itu berada di kisaran 100 °C.

Pendugaan temperatur

Perhitungan mengenai besar temperatur bawah permukaan dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain geothermometer silika (Fournier 1983, dalam Nicholson 1993),

geothermometer Na-K (Giggenbach 1988, dalam Nicholson, 1993), dan geothermometer Na-K-Ca (Fournier dan Truesdaell, 1973 dalam Nicholson, 1993) (Tabel 8).

Berdasarkan geothermometer silika, temperatur berkisar antara 151-167 °C dan pada perhitungan menggunakan geothermometer Na-K-Ca menghasilkan kisaran temperatur 169-171 °C. Namun, perhitungan geothermometer Na-K-Ca ini kurang sesuai jika digunakan karena kandungan SiO₂ yang relatif lebih tinggi dibandingkan kandungan Ca.

Sedangkan perhitungan geothermometer Na-K menghasilkan kisaran temperatur antara 209-215 °C. Namun, pada saat *plotting* terhadap diagram Na-K-Mg (Giggenbach, 1998) terlihat bahwa APK 4 dan APK 1 terletak pada zona transisi antara *partial equilibration* dengan *immature water*, dan temperatur hasil geothermometer Na-K menunjukkan angka 210 dan 209 °C. Berdasarkan hasil *plotting* dan perhitungan geothermometer ini dapat dikatakan bahwa temperatur bawah permukaan dari lokasi penelitian berada di kisaran 209 -210 °C. Pada perhitungan ini, nilai geothermometer dari APS 1, APS 2, dan APSW tidak dapat dijadikan acuan karena berada pada zona *immature water*.

Sistem panasbumi

Sistem panas bumi daerah penelitian termasuk ke dalam sistem panas bumi yang bersumber dari Gunung Mahawu. Hal ini dikarenakan tidak terdapat manifestasi yang muncul di sekitar Gunung Klabat meskipun gunung ini lebih dekat dengan manifestasi air panas yang muncul di Kaleosan. Munculnya mata air panas ini terdapat pada Satuan Geomorfologi Lereng Tondano. Kemungkinan mata air panas muncul pada satuan ini karena bentuknya yang bergelombang sebagai akibat adanya gaya tektonik. Gaya tektonik ini pula yang menyebabkan terdapatnya banyak rekahan dan indikasi struktur pada satuan ini

sebagai tempat munculnya mata air panas. Hal yang menyebabkan terpisahnya sistem ini dari Gunung Klabat adalah adanya Sesar Kuwil yang menjadi penyekat antara sistem Gunung Klabat dengan sistem panas bumi Gunung Mahawu. Sesar Kuwil ini memisahkan dan membatasi aktivitas hidrotermal kedua gunung tersebut.

Mata air panas yang muncul di daerah Kaleosan memiliki temperatur yang relatif tinggi dibandingkan dengan mata air panas di Sawangan dan Sampiri. Hal ini dikarenakan mata air panas Kaleosan berada pada zona transisi *upflow* di mana air dari dalam dengan cepat keluar melalui rekahan dan sedikit mengalami kontak dengan air meteorik, sehingga temperaturnya pun relatif tinggi, mencapai 88 °C. selain itu, topografi pada lokasi ini relatif landai dengan elevasi yang lebih rendah dibandingkan mata air panas sawangan dan sampiri. Sedangkan mata air panas Sawangan dan Sampiri berada pada zona *outflow*, sehingga temperaturnya relatif lebih rendah sebagai akibat dari interaksi dengan air meteorik. Topografi pada mata air panas ini relatif lebih curam dan memiliki elevasi yang lebih tinggi dibandingkan mata air Kaleosan.

Litologi tempat munculnya mata air panas yang termasuk dalam Satuan Produk Kaldera Tondano (TnAp) diasumsikan sebagai batuan penutup (*cap rock*), karena munculnya mineral ubahan lempung yang memiliki sifat kedap air sehingga dapat menahan fluida yang akan lewat. Reservoir pada sistem panas bumi ini diperkirakan masih aliran piroklastik juga karena memiliki banyak rongga yang dapat berfungsi sebagai tempat penyimpanan fluida (Gambar 7).

Mengacu pada hasil perhitungan geothermometer, reservoir dari sistem panas bumi ini memiliki suhu berkisar antara 209-210 °C, sehingga menurut klasifikasi Hochstein (2000) berada pada sistem panas bumi bersuhu sedang (125-225 °C), dan berdasarkan ciri-ciri manifestasi yang ditemukan di lapangan, maka sistem

panas bumi daerah penelitian termasuk ke dalam jenis *liquid dominated* dan berkaitan erat dengan sistem vulkanik.

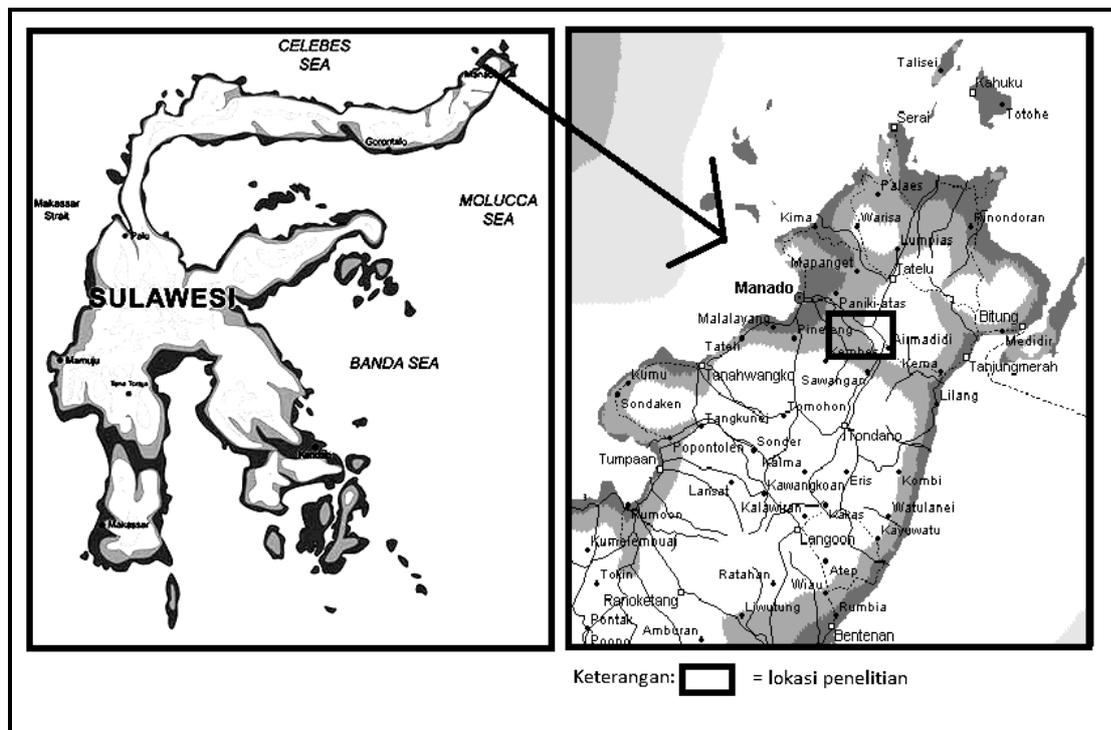
KESIMPULAN

Dari uraian yang telah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut: 1) Litologi penyusun pada daerah penelitian terdiri dari tujuh satuan dengan urutan dari tua ke muda yaitu Produk Kaldera Tondano, Lava Pinandaan, Aliran Piroklastik Tingtingon, Lava Klabat 2, Lava Klabat 3, Aliran Piroklastik Klabat 1, Aliran Piroklastik Klabat 2; 2) Tipe alterasi yang berkembang di daerah penelitian adalah tipe argilik dengan adanya mineral lempung berupa *montmorillonite* dan *halloysite*; 3) Tipe alterasi argilik ini tersebar di daerah barat laut dan barat daya pada lokasi penelitian dengan intensitas pada lokasi barat laut lebih banyak; 4) Tipe air pada daerah penelitian terbagi menjadi dua yaitu tipe *dilute* klorida-bikarbonat dan tipe bikarbonat. Lingkungan air panas pada daerah ini berada pada lingkungan vulkanik magmatik. Sedangkan asal air panas berasal langsung dari kedalaman dan ada yang terpengaruh oleh air meteorik; 5) Berdasarkan hasil perhitungan geothermometer maka temperatur bawah permukaan pada sistem ini berada pada kisaran 209-210° C; 6) Sistem panasbumi daerah kalawat memiliki sumber panas dari Gunung Mahawu yang berada di barat daya di luar lokasi penelitian. Batuan reservoir diperkirakan berupa aliran piroklastik yang memiliki rongga sehingga dapat menampung fluida. Sedangkan lapis-an penutup berupa aliran piroklastik dengan kehadiran mineral lempung yang bersifat *impermeable* sehingga mampu menahan laju fluida. Sistem air panas daerah Kalawat termasuk ke dalam sistem temperatur sedang dan didominasi air (*water dominated*).

DAFTAR PUSTAKA

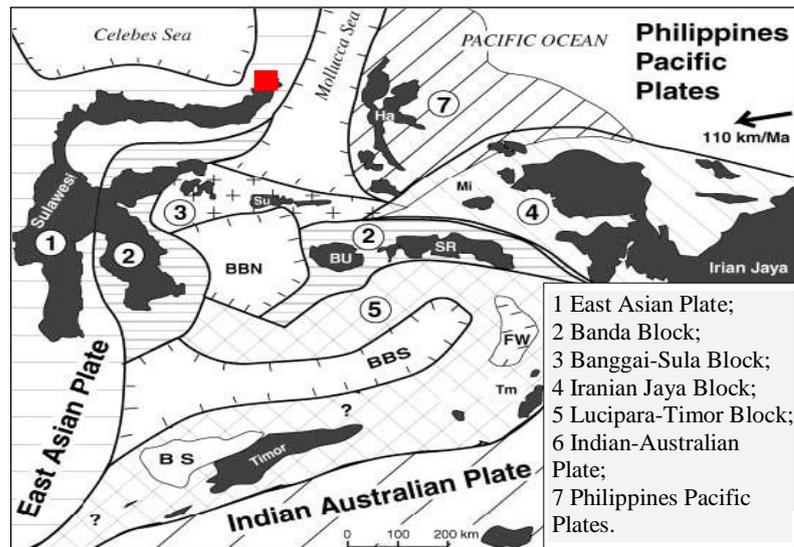
- Browne, P.R.L. 1996. *Hydrothermal Alteration. Lecture Handout*. 655.611, The University of Auckland.
- Corbett, G.J., and Leach, T.M. 1997. *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structures, Alteration, and Mineralization*. Short Course Manual.
- Effendi, dan Bawono. 1997. *Peta Geologi Lembar Manado, Sulawesi Utara*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi

- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids : Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag. Berlin
- Pusat Sumber Daya Geologi. 2014. *Laporan Survei Panas Bumi Kalawat, Sulawesi Utara (Internal Report)*. Tidak dipublikasikan.
- Raybach, L. and Muffler, L.J.P., 1981. *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*. John Willey and Sons. Chiches.

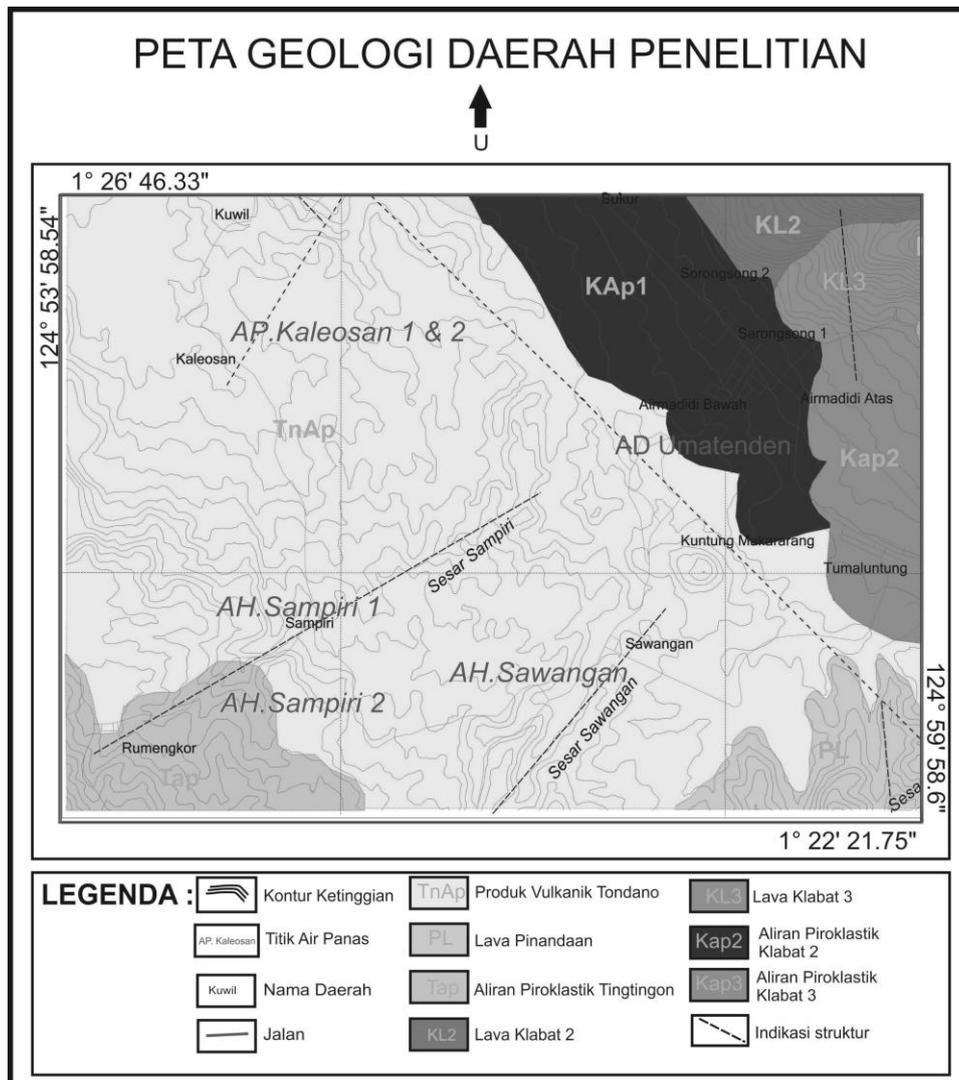


Gambar 1

Lokasi daerah penelitian termasuk ke dalam Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara.



Gambar 2. Geologi regional daerah penelitian



Gambar 3. peta geologi daerah penelitian

Tabel 1. Mineral Ubahan yang Terdapat pada Daerah Penelitian

Stasiun	Tipe analisis	Komposisi mineral									
		Oks	Ct	Op	Hal	Mont	Jar	Kao	Tef	Musc	ill
KL 1a	PIMA			•		•					•
KL 1b	PIMA		•	•	•	•					
KL 1 Cl	PIMA					•					
KLR 3	PIMA		•	•	•		•				
KLR 4	PIMA					•	•		•		
KLR 5	PIMA					•		•			
KLN 7	PIMA				•	•				•	
KL 7	Petrografi	•									
KLN 38	Petrografi	•									
KLN 8	Petrografi	•									
KLN 31	Petrografi	•									
KLN 28	Petrografi	•									

Keterangan: Oks=Mineral Oksida; Ct=Kalsit; Op=Opal; Hal=Halloysite; Mont=Montmorillonite; Jar=Jarosite; Kao=Kaolinite; Tef=teflon; Musc=Muscovite; Ill=Illite; Par=Paragonite

Tabel 2. Karakteristik manifestasi air panas

Nama Mata Air	Kode	Kordinat		T (suhu) (°C)	pH	DHL (µm/cm)	Keterangan
		x	y				
Air Panas Kaleosan 1	APK 1	713273	157964	88.7	6.75	2000	AP jernih, tawar, sinter karbonat, sedikit bau belerang.
Air Panas kaleosan 2	APK 2	713334	157995	68.5	6.83	1434	AP muncul di dasar sungai, jernih, rasa tawar dan gelembung gas kuat.
Air Panas kaleosan 3	APK 3	713207	157774	88.5	6.96	1910	AP jernih, rasa tawar, muncul dari celah batuan, temp 68-88,5°C.
Air Panas kaleosan 4	APK 4	712998	158057	87.5	7.17	1970	AP muncul di batuan piroklastik, jernih, dan rasa tawar, sinter karbonat dan oksida besi.
Air Panas Sampiri 1	APS 1	715349	154322	40.9	7.13	392	AP muncul berupa <i>seepage</i> , jernih dan rasa tawar.
Air Panas Sampiri 2	APS 2	715036	153826	42.4	7.2	518	AP telah dibuat kolam diameter ± 1 m, jernih dan rasa tawar.
Air Panas Sawangan	APSW	715342	153913	39.7	7.12	214	AP muncul dari celah batuan, jernih, dan rasa tawar.

Keterangan: DHL = Daya Hantar Listrik

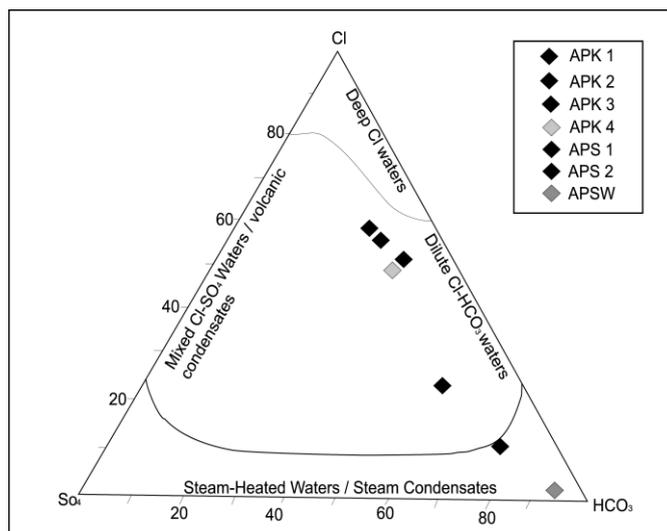
Tabel 3. Data Kimia Air Panas Daerah Kalawat, Minahasa Utara

	AP Kaleosan 1	AP Kaleosan 2	AP Kaleosan 3	AP Kaleosan 4	AP Sampiri 1	AP Sampiri 2	AP Sawangan
	APK -1	APK -2	APK -3	APK -4	APSM-1	APSM-2	APSW
pH	6.75	6.83	6.96	7.17	7.13	7.2	7.12
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2000	1434	1910	1970	392	518	214
SiO ₂ (mg/L)	164.39	126.16	164.67	142.70	140.06	136.35	129.15
B	5.82	3.57	5.63	5.65	0.12	0.12	0.02
Al ³⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.07	0.08	0.05	0.11	0.04	0.07	0.02
Ca ²⁺	56.71	33.29	46.88	53.24	19.82	29.99	13.31
Mg ²⁺	2.16	3.80	2.28	1.45	9.68	15.49	6.02
Na ⁺	376.18	216.31	351.03	361.62	33.37	35.26	19.84
K ⁺	27.81	17.35	26.55	27.08	8.26	8.49	3.40
Li ⁺	0.98	0.62	0.96	0.94	0.02	0.02	0.01
As ³⁺	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
NH ₄ ⁺	0.70	0.61	0.60	0.61	0.01	0.02	0.03
F ⁻	0.52	0.21	0.42	0.34	0.01	0.06	0.04
Cl ⁻	460.40	265.40	425.45	417.36	27.40	56.64	1.54
SO ₄ ²⁻	89.48	57.67	84.82	77.36	15.20	25.54	3.66
HCO ₃	257.74	180.99	225.47	281.65	142.67	145.41	116.65
Sum Cation (%)	20.3	11.99	18.69	19.46	3.53	4.53	2.11
Sum Anion (%)	19.1	11.67	17.49	18.02	3.43	4.52	2.03
Ion Balance (%)	3	1	3	4	1	0	2

Keterangan: Kecuali pH, semua unsur/senyawa dalam satuan mg/Kg

Tabel 4. Persentase Kandungan Cl-SO₄-HCO₃ dan Klasifikasi Tipe Air

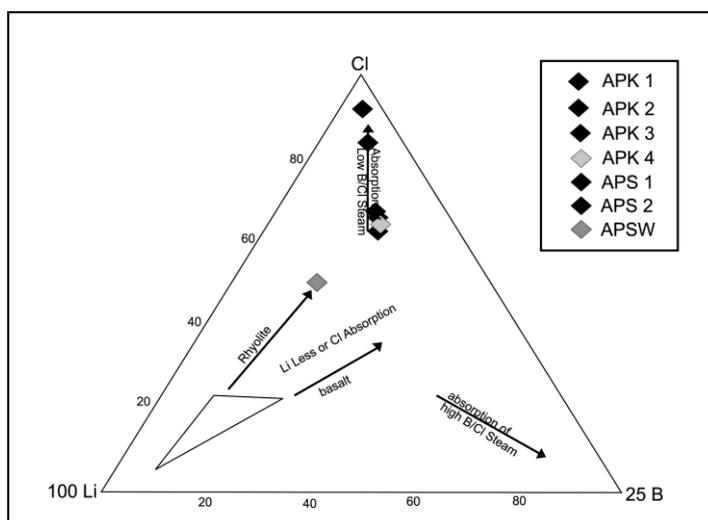
Tipe Air Panas	Kode	Temperatur	pH	kandungan (%)		
		(°C)		Cl	SO ₄	HCO ₃
Dilute klorida-bikarbonat	APK 1	88.7	6.75	57.007	11.079	31.913
	APK 2	68.5	6.83	52.652	11.441	35.906
	APK 3	88.5	6.96	57.826	11.528	30.645
	APK 4	87.5	7.17	53.758	9.964	36.278
	APS 2	42.4	7.2	24.887	11.222	63.891
Bikarbonat	APS 1	40.9	7.13	14.789	8.204	77.006
	APSW	39.7	7.12	1.2638	3.004	95.732



Gambar 4. Hasil *Plotting* kandungan Cl-SO₄-HCO₃ Sampel Air Panas

Tabel 5. Persentase Kandungan Cl-Li-B

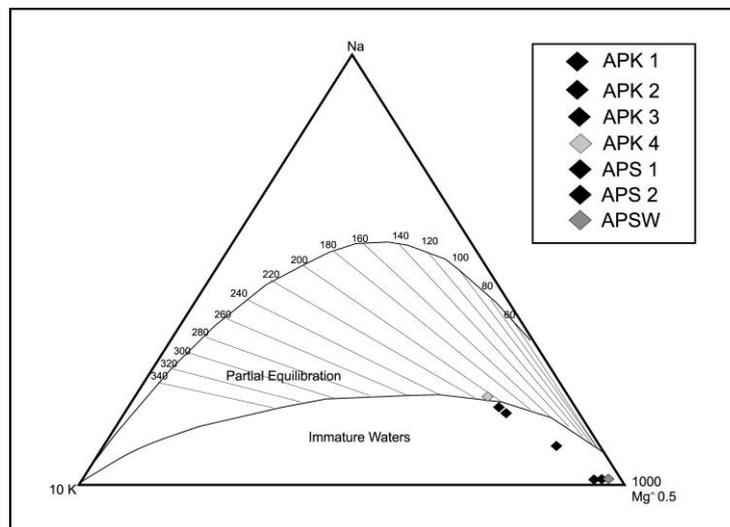
Asal dan lingkungan air panas	kode	Temperatur	pH	kandungan (%)		
		(⁰ C)		Cl	100Li	25B
Vulkanik magmatik	APK 1	88.7	6.75	65.407	13.922	20.670
	APK 2	68.5	6.83	63.698	14.880	21.421
	APK 3	88.5	6.96	64.248	14.497	21.255
	APK 4	87.5	7.17	63.952	14.403	21.644
	APS 1	40.9	7.13	84.568	6.173	9.259
	APS 2	42.4	7.2	91.888	3.2445	4.867
	APSW	39.7	7.12	50.658	32.895	16.447



Gambar 5. Hasil *Plotting* kandungan Cl-Li-B mata air panas daerah Kalawat pada diagram Cl-Li-B (Giggenbach, 1991)

Tabel 6. Persentase Kandungan Na-K-Mg

Asal dan lingkungan air panas	kode	Temperatur	pH	kandungan (%)		
		(°C)		Na/1000	k/100	√Mg
Berasal dari kedalaman, namun ada pengaruh air permukaan	APK 1	88.7	6.75	17.711	13.093	69.195
	APK 2	68.5	6.83	9.247	7.417	83.335
	APK 3	88.5	6.96	16.507	12.485	71.007
	APK 4	87.5	7.17	19.690	14.744	65.565
Dominan pengaruh air permukaan	APS 1	40.9	7.13	1.034	2.559	96.406
	APS 2	42.4	7.2	0.869	2.093	97.037
	APSW	39.7	7.12	0.791	1.356	97.852



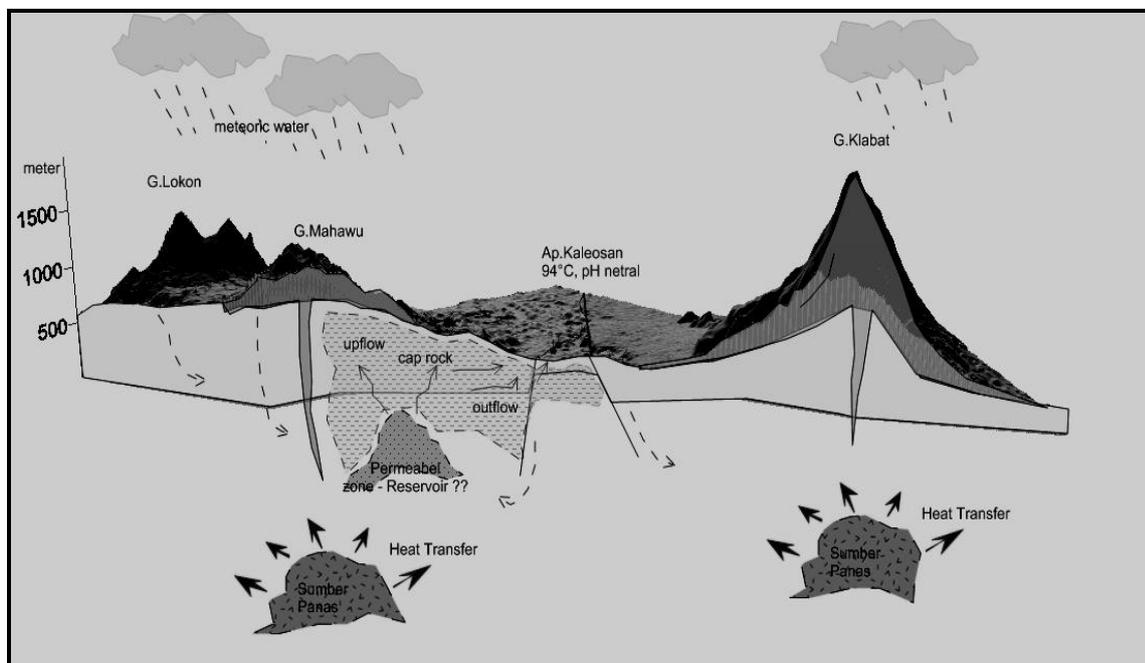
Gambar 6 Hasil *Plotting* kandungan Na-K-Mg mata air panas daerah Kalawat pada diagram Na-K-Mg (Giggenbach, 1988)

Tabel 7. Temperatur Pembentukan Mineral

	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
illite													
kaolonite													
Halloysite													
montmorillonite													

Tabel 8. Hasil Perhitungan Geothermometer

	Geothermometer silika (dalam °C)	Geothermometer Na-K (dalam °C)	Geothermometer Na-K-Ca (dalam °C)
APK 1	167	209	169
APK 2	151	215	169
APK 3	167	211	171
APK 4	158	210	170
APS 1	157	317	81
APS 2	156	314	73
APSW	152	279	56



Gambar 7

Model Tentatif sistem panas bumi Kalawat (tanpa skala), dengan arah penampang barat daya-timur laut pada daerah penelitian (PSDG, 2014)