

PARAGENESIS MINERAL DAN INKLUSI FLUIDA PADA ENDAPAN EPITERMAL, AREA *MAIN RIDGE* DAN *OSELA*, DISTRIK BAKAN, SULAWESI UTARA

RIZQI FAISHAL SIPATRIOT, ANDRI S. SUBANDRIO

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Email: rizqifaishalsipatriot@gmail.com

Sari – Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui paragenesis mineral dan karakteristik fluida hidrotermal yang membentuk endapan epitermal sulfidasi tinggi. Penelitian dilakukan di area *Main Ridge* dan *Osela*, Distrik Bakan, Desa Motandoi, Kecamatan Pinolosian Timur, Kabupaten Bolaang Mongondow Selatan, Provinsi Sulawesi Utara. Metode penelitian yang digunakan antara lain; analisis petrologi megaskopis, petrografi, mineragrafi, geokimia dan inklusi fluida. Asosiasi mineral dan proses silisifikasi intensif serta tekstur *vuggy* yang terbentuk mengindikasikan adanya mineralisasi epitermal sulfidasi tinggi. Pada area *Main Ridge* kisaran kadar Au 0.4-1 g/t, Ag 1-3 g/t, Cu 5-63 g/t, Pb 5-55 g/t, Zn 4-5 g/t, sedangkan pada area *Osela* kisaran kadar Au 1-89,4 g/t, Ag 4-33 g/t, Cu 306-403 g/t, Pb 30-120 g/t, Zn 14-41 g/t, pola tersebut sesuai dengan kehadiran pirit euhedral, kalkopirit, enargit-luzonit pada area *Osela* dan tidak hadir pada area *Main Ridge*. Pada area *Main Ridge* memiliki temperatur homogenitas (Th) 212 °C, salinitas 2.5 wt. % NaCl eq., dan kedalaman mineralisasi 210 m, pada area *Osela* memiliki Th 267 °C, salinitas 2.9 wt. % NaCl eq., dan kedalaman mineralisasi 620 m. Data inklusi fluida menunjukkan adanya pencampuran fluida hidrotermal yang berkembang di area *Main Ridge*, sedangkan pada area *Osela* menunjukkan adanya pengenceran fluida hidrotermal selama proses evolusi fluida.

Kata kunci: Epitermal, Distrik Bakan, paragenesis mineral, inklusi fluida.

Abstract – This research was conducted to determine mineral paragenesis and the characteristics of hydrothermal fluids which form high sulfidation epithermal deposits. The research was conducted in the *Main Ridge* and *Osela* areas, Bakan District, Motandoi Village, East Pinolosian District, Bolaang Mongondow Regency, North Sulawesi Province. Research methods include megascopic petrology, petrographic, mineragraphic, geochemical and fluid inclusion analysis. The association of minerals, intensive silicification process and vuggy textures indicate the presence of high sulfidation epithermal mineralization. In the *Main Ridge* area the range content of Au 0.4-1 g/t, Ag 1-3 g/t, Cu 5-63 g/t, Pb 5-55 g/t, Zn 4-5 g/t, whereas in the *Osela* area the range content of Au 1-89.4 g/t, Ag 4-33 g/t, Cu 306-403 g/t, Pb 30-120 g/t, Zn 14-41 g/t, the pattern corresponds to the presence of euhedral pyrite, chalcopyrite and enargite-luzonite in the *Osela* area and not present in the *Main Ridge* area. *Main Ridge* area has homogeneity temperature (Th) 212 °C, salinity 2.5 wt. % NaCl eq., and mineralization depth 210 m, in the *Osela* area it has Th 267 °C, salinity 2.9 wt. % NaCl eq., and mineralization depth 620 m. Fluid inclusion data indicate the mixing of hydrothermal fluids that develop in the *Main Ridge* area, while the *Osela* area shows the dilution of hydrothermal fluids during the process of fluid evolution.

Key words: Epithermal, Bakan District, mineral paragenesis, fluid inclusions.

1. PENDAHULUAN

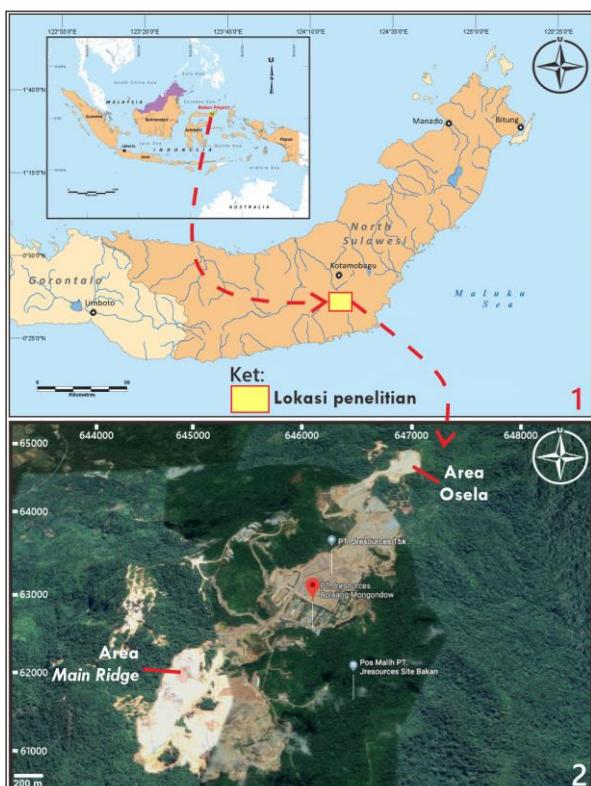
Distrik Bakan adalah lokasi pertambangan yang aktif ditambang. Daerah penelitian berada di area *Main Ridge* dan *Osela*, Distrik Bakan, Desa Motandoi, Kecamatan Pinolosian Timur, Kabupaten Bolaang Mongondow Selatan, Provinsi Sulawesi Utara (**Gambar 1**). Pada Distrik Bakan berkembang endapan epitermal sulfidasi tinggi, terdapat beberapa area prospek yang diberi nama area Durian, *Osela* Utara (atau *Osela*), *Osela* Selatan, Villa, *Main Ridge*, Jalina, Tengkorak, Gunung Botak, *Camp Prospek*, dan *Waterfall* (Hardjana, 2012).

Penelitian ini membahas mengenai paragenesis mineral dan karakteristik fluida hidrotermal yang membentuk endapan epitermal sulfidasi tinggi, berdasarkan data asosiasi mineral dan inklusi fluida.

2. SAMPEL DAN METODE

Sampel batuan yang digunakan adalah *hand specimen* yang berasal dari singkapan tuf dasitik dan tuf breksi dasitik yang mengalami silisifikasi intensif. Analisis laboratorium dilakukan pada tujuh sampel batuan, tiga

sampel batuan pada area *Main Ridge* dan empat sampel batuan pada area Osela. Tuf dasitik dan tuf breksi dasitik yang dipilih berada pada zona alterasi silika *vuggy*, zona alterasi ini diyakini berada dekat dengan sumber fluida hidrotermal.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Distrik Bakan (Saipulah, 2019a) (1); area tambang *Main Ridge* dan Osela (Google, n.d.) (2).

Metodologi penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan gambaran mengenai paragenesis mineral dan karakteristik fluida hidrotermal antara lain; analisis petrologi megaskopis, petrografi, minerografi, geokimia dan inklusi fluida. Analisis petrologi megaskopis dilakukan untuk karakteristik fisik batuan secara megaskopis, dilakukan pada tujuh sampel batuan. Analisis petrografi dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik batuan secara petrografi, dilakukan pada 12 sampel sayatan tipis. Analisis minerografi dilakukan untuk mengatahui komposisi mineral sulfida, dilakukan pada 10 sampel sayatan poles. Analisis petrografi dan minerografi dilakukan di Laboratorium Petrografi di Jurusan Teknik Geologi, Institut Teknologi Bandung. Analisis geokimia untuk menentukan kadar logam mulia dan dasar, dilakukan pada tujuh sampel batuan. Analisis geokimia dilakukan di

laboratorium pada departemen metalurgi, PT. J Resources Bolaang Mongondow. Analisis inklusi fluida dilakukan untuk mengetahui temperatur homogenitas dan temperatur meleleh es pada batuan, dilakukan pada dua sampel sayatan poles ganda yang mewakili area *Main Ridge* dan Osela. Analisis inklusi fluida dilakukan di Laboratorium Eksplorasi di Jurusan Geotermal Institut Teknologi Bandung.

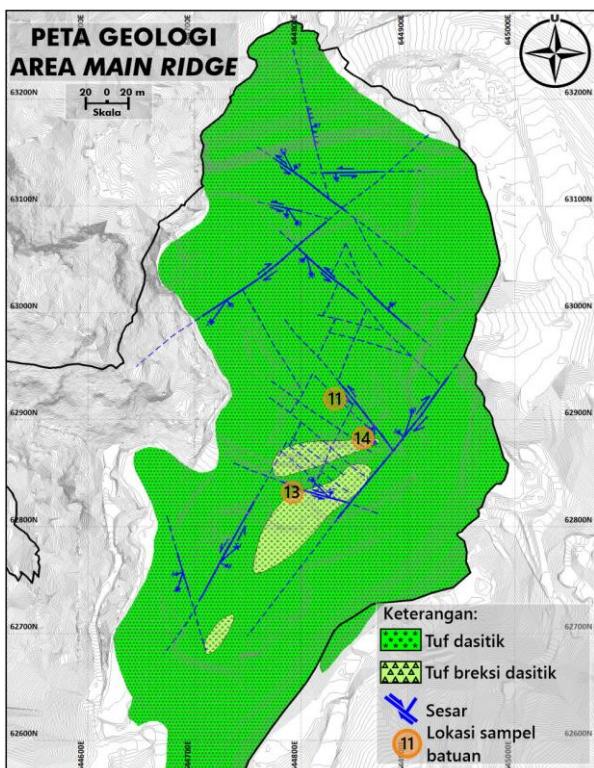
3. GEOLOGI AREA PENELITIAN

Geologi Sulawesi Utara didominasi oleh unit batuan gunungapi berumur Kenozoik dan berasosiasi dengan intrusi yang membentuk kepulauan busur gunungapi komposit (Carlile, dkk., 1990). Pola struktur yang berkembang pada busur ini sebagian besar disebabkan oleh pergerakan kerak samudera yang terbentuk selama proses pembukaan Laut Sulawesi pada umur Eosen (van Leeuwen dan Muhardjo, 2005). Pada Distrik Bakan terjadi dua peristiwa magmatik, yaitu yang pertama adalah instrusi diorit pada kala Miosen yang memotong lava andesitik dan unit sedimen dan kedua adalah volkanisme Pliosen – Pleistosen yang menyebabkan terbentuknya batuan piroklastik dasitik dan asosiasi alterasi asam-sulfat (Hardjana, 2012). Stratigrafi batuan pada Distrik Bakan dari yang tertua ke yang termuda (Hardjana, 2012), sebagai berikut; 1) batuan dasar Miosen Tengah hingga Miosen Akhir, 2) Bakan sekuen Pliosen hingga Pleistosen, 3) satuan batuan Pleistosen, 4) Endapan Resen. Litologi yang tersingkap pada area *Main Ridge* disusun oleh tuf dasitik dan tuf breksi dasitik (**Gambar 2**). Terdapat sesar mendatar dengan arah timurlaut – baratdaya dan baratlaut – tenggara. Litologi pada area Osela disusun oleh tuf dasitik, tuf breksi dasitik, maar dan endapan breksi laharik (**Gambar 3**). Terdapat sesar mendatar berarah timurlaut – baratdaya.

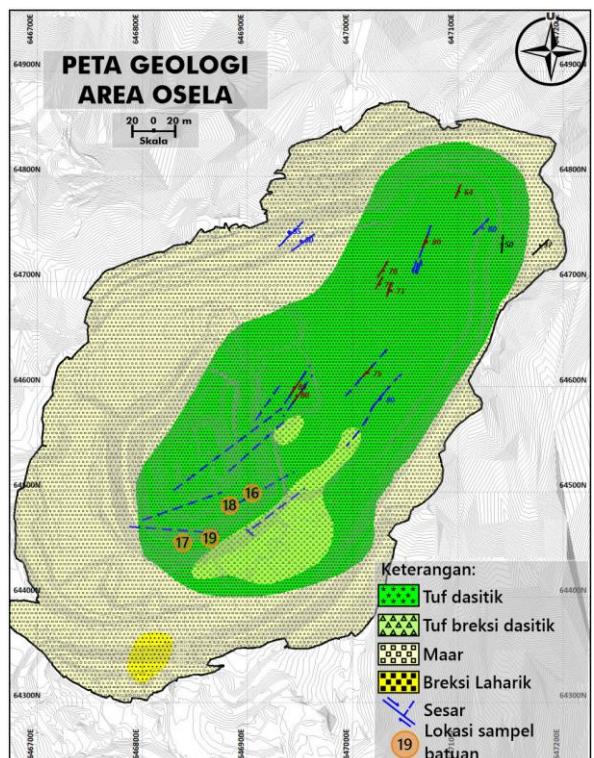
4. LITOLOGI, MINERALOGI, DAN KADAR LOGAM

Pada area *Main Ridge* diambil tiga sampel batuan. Sampel batuan MR-11 berupa tuf dasitik yang telah mengalami silisifikasi intensif dan membentuk alterasi silika *vuggy*. Mineral alterasi yang terbentuk berupa mikro granular silika, kuarsa dan sedikit rutil, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit,

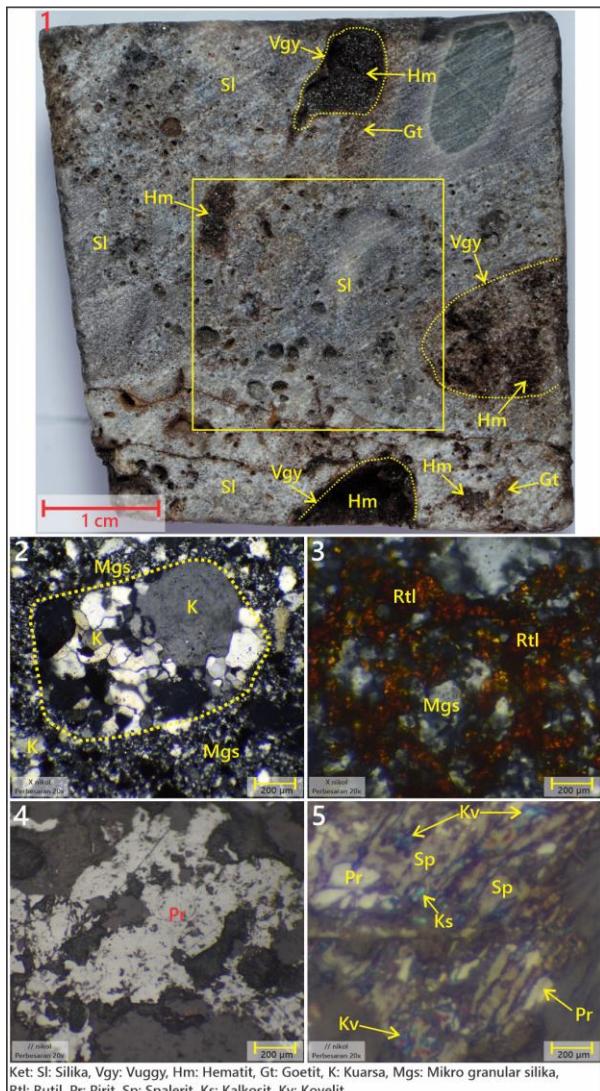
spalerit, kovelit dan sedikit kalkosit. Tingkat oksidasi kuat dan membentuk mineral oksida hematit dan goetit (**Gambar 4**). Kadar logam Au 1 g/t, Ag 3 g/t, Cu 54 g/t, Pb 55 g/t, Zn 5 g/t.



Gambar 2. Peta geologi area *Main Ridge* (Saipulah, 2019b).

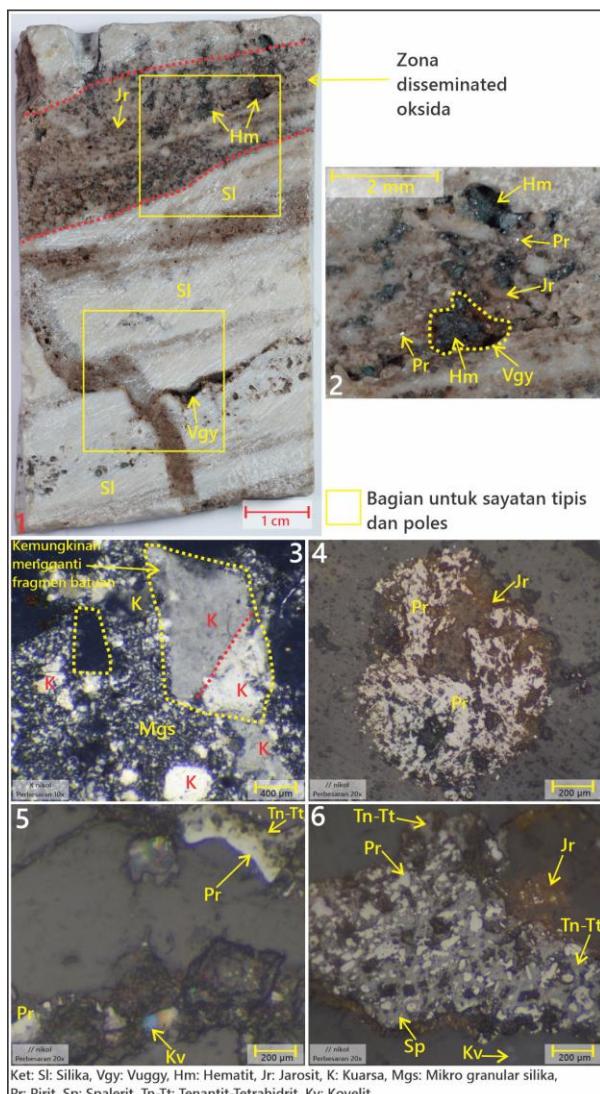


Gambar 3. Peta geologi area Osela (Saipulah, 2019c).



Gambar 4. Sampel MR-11 berupa foto sampel hand specimen tuf dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); sayatan tipis nikol silang memperlihatkan kuarsa dan mikro granular silika (2); rutil dan mikro granular silika, rutil tidak dominan dan hanya tersebar terbatas (3); sayatan poles memperlihatkan pirit (4); dan pirit berasosiasi dengan spalerit, kovelit dan sedikit kalkosit (5).

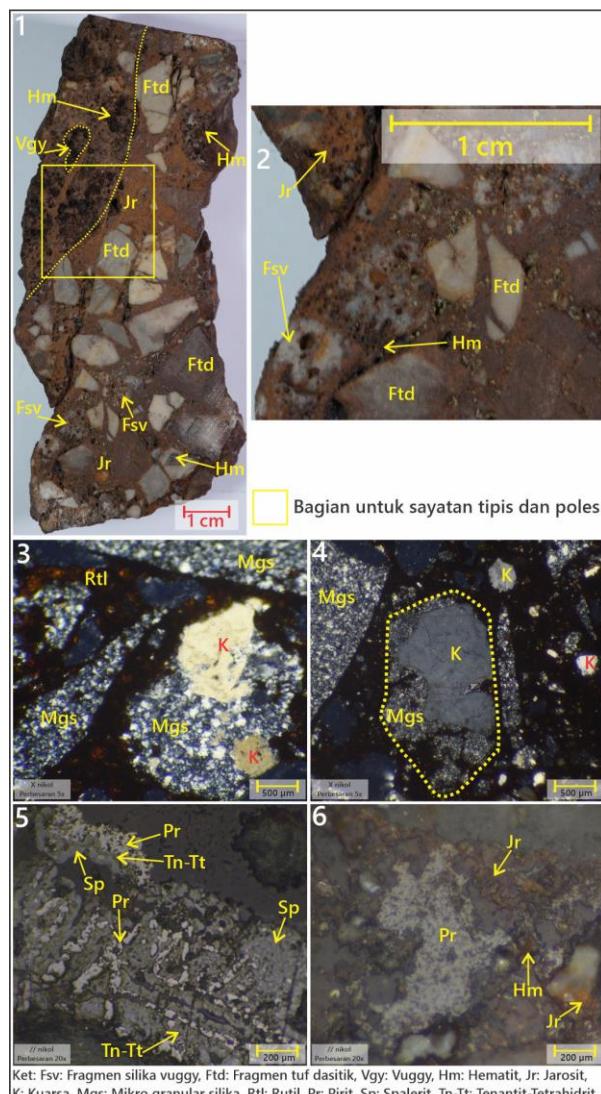
Sampel batuan MR-13 berupa tuf dasitik yang telah mengalami silisifikasi secara keseluruhan dan membentuk alterasi silika vuggy. Mineral alterasi yang terbentuk berupa mikro granular silika dan kuarsa, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit, spalerit, kovelit dan sedikit tenantit-tetrahidrit. Tingkat oksidasi sedang-kuat, dan membentuk mineral oksida berupa hematit dan jarosit (**Gambar 5**). Kadar logam Au 0.4 g/t, Ag 1 g/t, Cu 5 g/t, Pb 5 g/t, Zn 4 g/t.



Ket: Sl: Silika, Vgy: Vuggy, Hm: Hematit, Jr: Jarosit, K: Kuarsa, Mgs: Mikro granular silika, Pr: Pirit, Sp: Spalerit, Tn-Tt: Tenantit-Tetrahidrit, Kv: Kovelit.

Gambar 5. Sampel MR-13 berupa foto sampel *hand specimen* tuf dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); perbesaran foto bagian zona *disseminated* oksida (2); sayatan tipis nikol silang memperlihatkan kuarsa dan mikro granular silika (3); sayatan poles memperlihatkan pirit berasosiasi dengan jarosit (4); kovelit, pirit berasosiasi dengan tenantit-tetrahidrit (5); dan pirit berasosiasi dengan spalerit dan sedikit tenantit-tetrahidrit (6).

Sampel batuan MR-14 berupa tuf breksi dasitik yang telah mengalami silisifikasi intensif dan membentuk alterasi silika *vuggy*. Mineral alterasi yang terbentuk berupa mikro granular silika, kuarsa dan sedikit rutil, berasosiasi dengan sulfida spalerit, pirit, sedikit tenantit-tetrahidrit, kehadiran spalerit cukup banyak. Tingkat oksidasi kuat dan membentuk hematit dan jarosit (**Gambar 6**). Kadar logam Au 0.9 g/t, Ag 1 g/t, Cu 63 g/t, Pb 6 g/t, Zn 4 g/t.

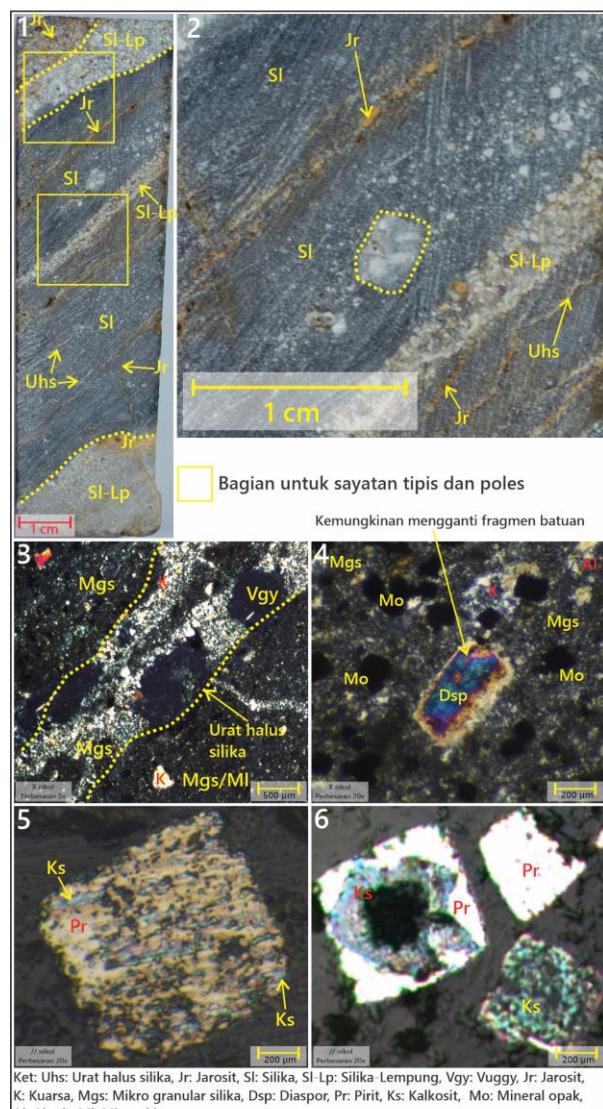


Ket: Fsv: Fragmen silika vuggy, Ftd: Fragmen tuf dasitik, Vgy: Vuggy, Hm: Hematit, Jr: Jarosit, K: Kuarsa, Mgs: Mikro granular silika, RtI: Rutil, Pr: Pirit, Sp: Spalerit, Tn-Tt: Tenantit-Tetrahidrit.

Gambar 6. Sampel MR-14 berupa foto sampel *hand specimen* tuf breksi dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); perbesaran foto bagian fragmen batuan (2); sayatan tipis nikol silang memperlihatkan kuarsa dan mikro granular silika pada fragmen tuf (3); kuarsa dan mikro granular silika pada fragmen silika *vuggy* (4); sayatan poles memperlihatkan pirit berasosiasi dengan spalerit dan tenantit-tetrahidrit (5); dan pirit berasosiasi dengan jarosit dan sedikit hematit (6).

Pada area Osela diambil empat sampel batuan. Sampel batuan OS-16 berupa tuf dasitik yang telah mengalami silisifikasi intensif dan membentuk alterasi silika. Mineral alterasi berupa mikro granular silika dan kuarsa, sedikit mineral lempung berupa kaolinit, alunit dan diaspor, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit dan sedikit kalkosit. Umumnya pirit hadir tersendiri dan berbentuk euhedral,

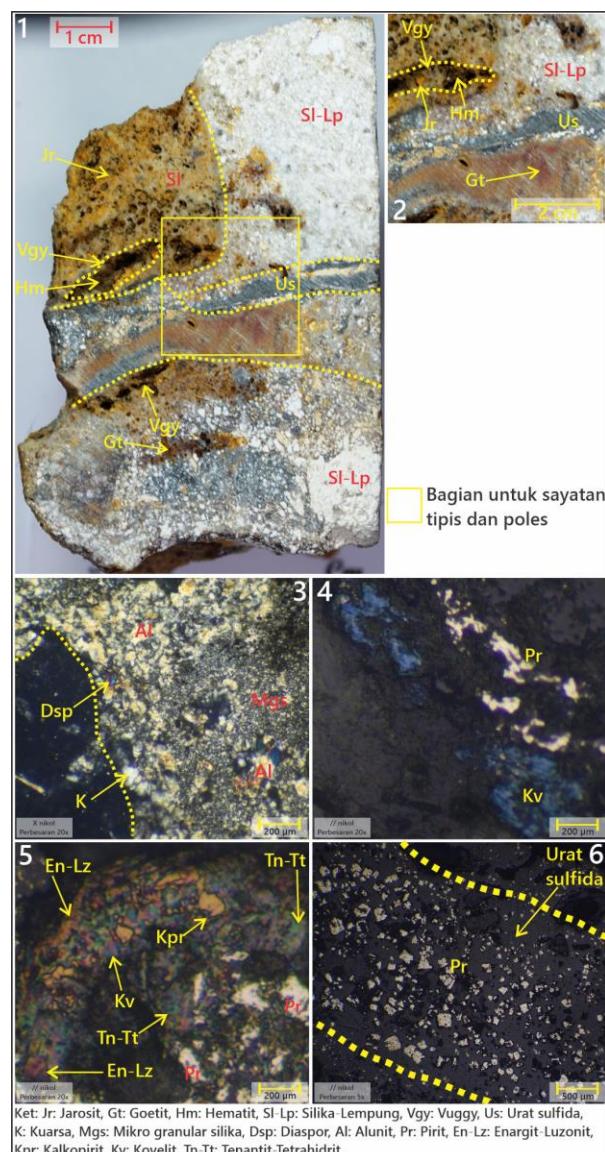
pirit jenis ini terkonsentrasi pada urat halus silika, sebagian pirit diganti oleh kalkosit. Tingkat oksidasi lemah dan membentuk jarosit (**Gambar 7**). Kadar logam Au 2 g/t, Ag 16 g/t, Cu 237 g/t, Pb 34 g/t, Zn 14 g/t.



Gambar 7. Sampel OS-16 berupa foto sampel *hand specimen* tuf dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); perbesaran foto bagian silika-lempung dan urat halus silika (2); sayatan tipis nikol silang memperlihatkan kuarsa dan mikro granular silika (3); mikro granular silika, sedikit diaspor dan alunit dan tersebar terbatas (4); sayatan poles memperlihatkan pirit diisi kalsosit (5); dan pirit diganti dengan kalsosit (6).

Sampel batuan OS-17 berupa tuf dasitik yang telah mengalami silisifikasi intensif dan membentuk alterasi silika vuggy. Mineral alterasi didominasi mikro granular silika dan

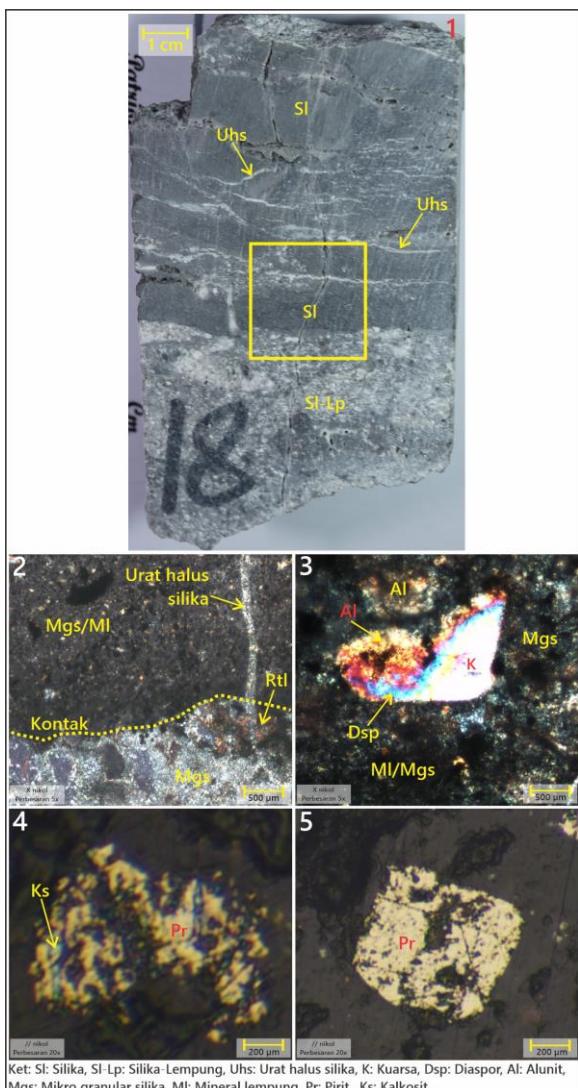
kuarsa, hadir mineral lempung kemungkinan kaolinit, alunit dan sedikit diaspor, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit, kalkopirit dan enargit-luzonit, sedikit tenantit-tetrahidrit dan kovelit. Pirit berbentuk euhedral umumnya terkonsentrasi pada urat sulfida dan tidak berasosiasi dengan sulfida lain. Tingkat oksidasi sedang-kuat dan membentuk hematit, jarosit dan sedikit goetit (**Gambar 8**). Kadar logam Au 1 g/t, Ag 4 g/t, Cu 402 g/t, Pb 120 g/t, Zn 24 g/t.



Gambar 8. Sampel OS-17 berupa foto *hand specimen* tuf dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); perbesaran foto bagian urat sulfida (2); sayatan tipis nikol silang memperlihatkan kuarsa, mikro granular silika, alunit dan sedikit diaspor (3); sayatan poles memperlihatkan pirit dan kovelit (4); pirit berasosiasi dengan kalkopirit, enargit-luzonit, kovelit dan sedikit

tenantit-tetrahidrit (5); dan pirit berbentuk euhedral umumnya terkonsentrasi di urat sulfida (6).

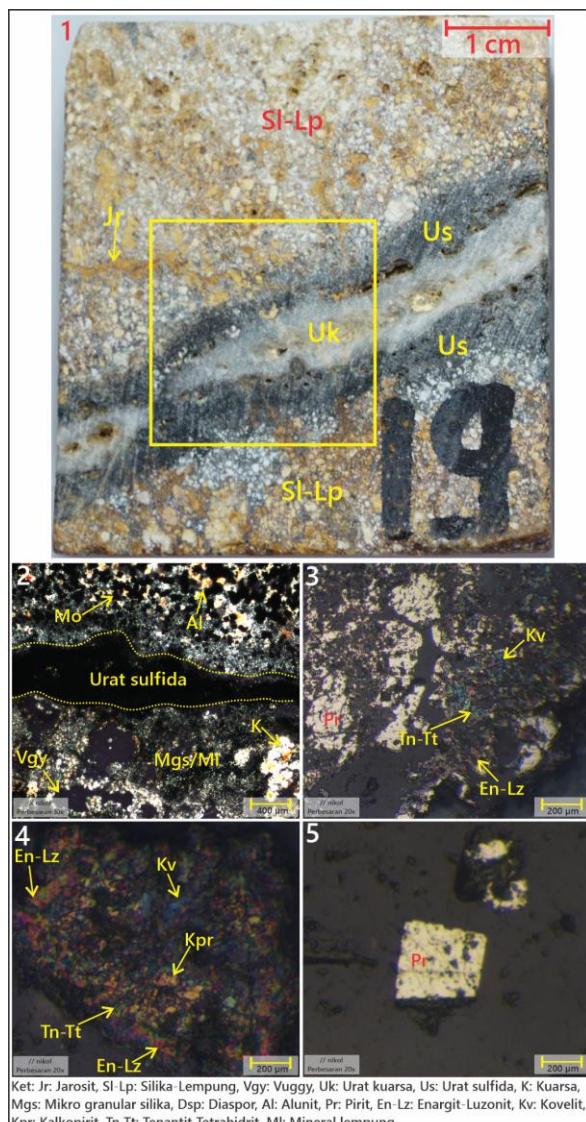
Sampel batuan OS-18 berupa tuf dasitik yang telah mengalami silisifikasi secara intensif dan membentuk alterasi silika. Mineral alterasi berupa mikro granular silika dan kuarsa, sedikit mineral lempung kemungkinan berupa kaolinit, alunit, diaspor dan sedikit rutil, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit dan sedikit kalkosit. Umumnya pirit hadir tersendiri dan berbentuk euhedral, pirit jenis ini terkonsentrasi pada urat halus silika dan sebagian pirit diganti kalkosit. Tingkat oksidasi lemah (**Gambar 9**). Kadar logam Au 89.4 g/t, Ag 33 g/t, Cu 403 g/t, Pb 30 g/t, Zn 19 g/t.



Gambar 9. Sampel OS-18 berupa foto *hand specimen* tuf dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); sayatan tipis nikol silang memperlihatkan mikro granular silika dan

sedikit rutil (2); kuarsa, mikro granular silika, alunit dan sedikit diaspor (3); sayatan poles memperlihatkan pirit dan kalkosit (4); pirit berbentuk euhedral di dalam urat halus silika (5).

Sampel batuan OS-19 berupa tuf dasitik yang telah mengalami silisifikasi intensif dan membentuk alterasi silika *vuggy*. Mineral alterasi berupa mikro granular silika dan kuarsa, hadir mineral lempung kemungkinan kaolinit, alunit, dan sedikit diaspor, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit, kalkopirit, enargit-luzonit, sedikit tenantit-tetrahidrit dan kovelit. Tingkat oksidasi sedang-kuat dan membentuk jarosit (**Gambar 10**). Kadar logam Au 4.4 g/t, Ag 11 g/t, Cu 206 g/t, Pb 95 g/t, Zn 41 g/t.



Gambar 10. Sampel OS-19 berupa foto *hand specimen* tuf dasitik mengalami silisifikasi intensif (1); sayatan tipis nikol silang

memperlihatkan kuarsa, mikro granular silika dan alunit (2); sayatan poles memperlihatkan pirit, enargit-luzonit, sedikit tenantit-tetrahidrit dan kovelit (3); enargit-luzonit, kalkopirit, kovelit dan sedikit tenantit-tetrahidrit (4); dan pirit berbentuk euhedral pada bagian urat sulfida (5).

5. PARAGENESIS MINERAL

Tahap paragenesis yang berkembang pada area *Main Ridge*, antara lain (**Tabel 1**):

1. Tahap 1 merupakan tahap awal alterasi hidrotermal. Tuf dasitik mengalami alterasi intensif dan terbentuk alterasi silika *vuggy*. Pada tahap ini mineral alterasi dominan adalah mikro granular silika dan kuarsa, kedua mineral alterasi ini mengisi sebagian tekstur *vuggy*, juga hadir sedikit rutil.
2. Tahap 2 merupakan tahap hipogen awal dan mineralisasi hidrotermal. Pada tahap ini mulai terbentuk pirit, sebagian pirit mengisi tekstur *vuggy* dan tersebar acak pada tubuh tuf dasitik, juga mengisi celah antar mineral.
3. Tahap 3 merupakan tahap hipogen lanjut dan mineralisasi hidrotermal. Pirit terus terbentuk dan sebagian mengganti pirit yang telah terbentuk pada tahap sebelumnya, terbukti ada beberapa pirit terlihat korosif dan berbentuk anhedral, seperti pada sampel MR-14. Pirit umumnya berasosiasi dengan mineral sulfida lain seperti spalerit dan sedikit tenantit-tetrahidrit. Tahap akhir dari hipogen lanjut mulai terbentuk sulfida lain seperti kovelit dan kalkosit, kedua mineral ini berasosiasi dengan pirit dan spalerit, kedua sulfida ini hadir tersendiri bukan sebagai pengisi atau pengganti di dalam pirit, seperti pada sampel MR-11 dan MR-13.
4. Tahap 4 merupakan tahap supergen dan oksidasi mineral. Terjadi pengkayaan mineral yang tahan terhadap proses oksidasi dan terbentuk mineral hasil oksidasi. Kombinasi mineral oksidasi hematit dan goetit umumnya muncul pada tuf dasitik, sedangkan kombinasi hematit dan jarosit umumnya muncul pada tuf breksi dasitik. Umumnya mineral oksidasi ini akan mengisi sebagian tekstur *vuggy*.

Pada area Osela terdapat beberapa tahap paragenesis mineral yang berkembang, antara

lain:

1. Tahap 1 merupakan tahap awal alterasi hidrotermal. Alterasi pada tuf dasitik dicirikan dengan terbentuk alterasi silika *vuggy* yaitu berupa lubang-lubang (pori-pori) yang tidak beraturan pada silika masif. Selain itu terdapat juga urat halus silika dan urat sulfida. Mineral alterasi dominan adalah mikro granular silika dan kuarsa, khususnya pada sampel batuan OS-16 dan OS-18, juga terdapat mineral lempung kemungkinan jenis kaolinit dan alunit, khususnya pada sampel batuan OS-17 dan OS-19, mineral alterasi lain yang terbentuk namun tidak dominan berupa alunit, rutil, dan diaspor, mengisi sebagian tekstur *vuggy*.
2. Tahap 2 merupakan tahap hipogen awal dan mineralisasi hidrotermal. Pirit terbentuk dan berasosiasi dengan enargit-luzonit dan kalkopirit. Pirit umumnya hadir sebagai mineral tersendiri, jarang berasosiasi dengan mineral sulfida lain. Pirit yang berbentuk euhedral biasanya terkonsentrasi pada urat sulfida terutama pada sampel batuan OS-17 dan OS-19 dan terkonsentrasi pada urat halus silika terutama pada sampel OS-16 dan OS-18.
3. Tahap 3 merupakan tahap hipogen lanjut dan mineralisasi hidrotermal. Pirit terus terbentuk dan berasosiasi dengan enargit-luzonit, kalkopirit, dan sedikit tenantit-tetrahidrit. Tahap akhir dari hipogen lanjut mulai terbentuk mineral sulfida lain seperti kovelit dan kalkosit. Umumnya kalkosit mengganti atau mengisi rongga yang terdapat pada pirit seperti pada sampel OS-16 dan OS-18, diperkirakan muncul pada tahap hipogen lanjut hingga transisi ke tahap supergen. Kovelit umumnya berasosiasi dengan sulfida lain, mineral ini hadir tersendiri bukan sebagai pengisi atau pengganti di dalam pirit seperti pada sampel OS-17 dan OS-19, diperkirakan muncul pada tahap hipogen lanjut.
4. Tahap 4 merupakan tahap supergen dan oksidasi mineral. Terjadi pengkayaan mineral yang tahan proses oksidasi dan terbentuk mineral hasil oksidasi. Pada sampel OS-16 dan OS 18 tingkat oksidasinya rendah dan hanya terbentuk sedikit jarosit, sedangkan pada sampel OS-

17 dan OS-19 tingkat oksidasi sedang-kuat, sehingga terbentuk kombinasi hematit dan jarosit dengan sedikit goetit. Mineral oksida

yang terbentuk hadir mengisi sebagian tekstur *vuggy*, khususnya pada sampel OS-17 dan OS-19.

Tabel 1. Paragenesis mineral yang terbentuk pada endapan epitermal sulfidasi tinggi di area *Main Ridge* dan Osela.

Mineralogi	Tahap Awal-Alterasi		Tahap Hipogen-Mineralisasi		Tahap Supergen-Oksidasi
	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3	Tahap 4	
Area Main Ridge					
Mikro granular silika	■■■				
Kuarsa	—				
Rutil	---				
Pirit		■■■■■			
Spalerit		■■■■■			
Tenantit-tetrahidrit		---	---	---	
Kalkosit			---	---	
Kovelit			---	---	
Hematit				■■■■■	
Jarosit				---	
Goetit				---	
Area Osela					
Mikro granular silika	■■■				
Kuarsa	—				
Alunit	—				
Rutil	---				
Mineral lempung (kaolinit)	---				
Diaspor	---				
Pirit		■■■■■			
Enargit-luzonit		---	---	---	
Kalkopirit		---	---	---	
Tenantit-tetrahidrit			---	---	
Kovelit			---	---	
Kalkosit				—	
Hematit				—	
Jarosit				—	
Goetit				—	

■ Dominan

— Umum

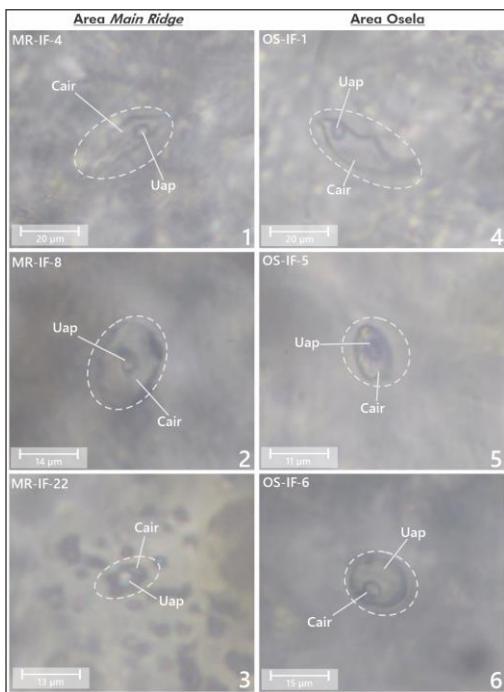
--- Mineral minor

6. INKLUSI FLUIDA

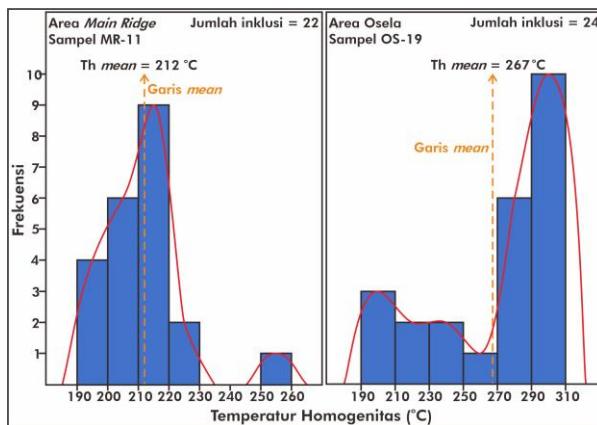
Data inklusi fluida yang dicatat adalah temperatur homogenitas (Th) dan temperatur leleh es (Tm-ice). Th pada sayatan MR-11 memiliki nilai rata-rata (*mean*) yaitu 212 °C., kisaran temperatur homogenitas 191-258 °C, jumlah sampel inklusi adalah 22 sampel. Th pada sayatan OS-19 memiliki nilai rata-rata (*mean*) yaitu 267 °C, kisaran temperatur homogenitas 198-298 °C, jumlah sampel inklusi adalah 24 sampel inklusi fluida (**Gambar 11**). Berdasarkan data Th dibuat diagram batang untuk mengetahui distribusi dan nilai tengah (**Gambar 12**). Nilai salinitas dari data temperatur leleh es (Tm-es), dihitung menggunakan rumus (Bodnar, 1993):

- Salinitas (wt.%) = $0.00 + 1.78 \theta - 0.0442 \theta^2 + 0.000557 \theta^3$

$$\theta = Tm-es$$

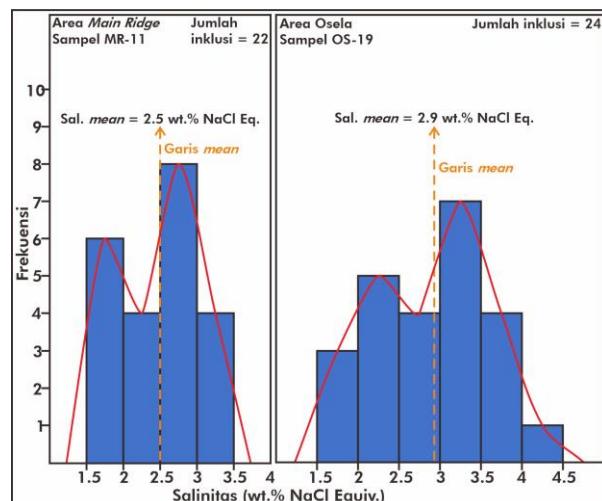


Gambar 11. Foto inklusi fluida, merupakan inklusi primer dan umumnya berbentuk tabular.



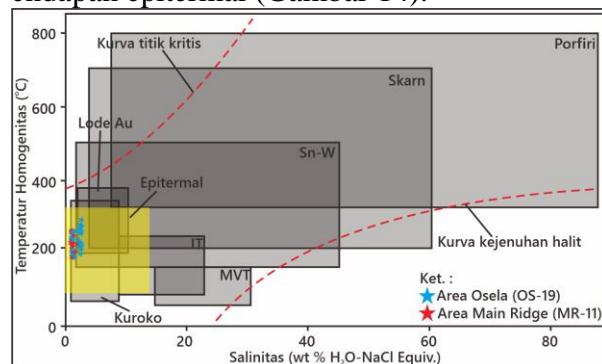
Gambar 12. Diagram batang Th area Main Ridge dan Osela.

Salinitas pada sayatan MR-11 memiliki rata-rata yaitu 2.5 wt. % NaCl eq., kisaran salinitas pada sayatan MR-11 mulai dari 1.57 wt. % NaCl eq., hingga 3.39 wt. % NaCl eq. Salinitas pada sayatan OS-19 memiliki rata-rata yaitu 2.9 wt. % NaCl eq., kisaran salinitas pada sayatan OS-19 mulai 1.57 wt. % NaCl eq., hingga 4.18 wt. % NaCl eq. (Gambar 13).



Gambar 13. Diagram batang salinitas area Main Ridge dan Osela.

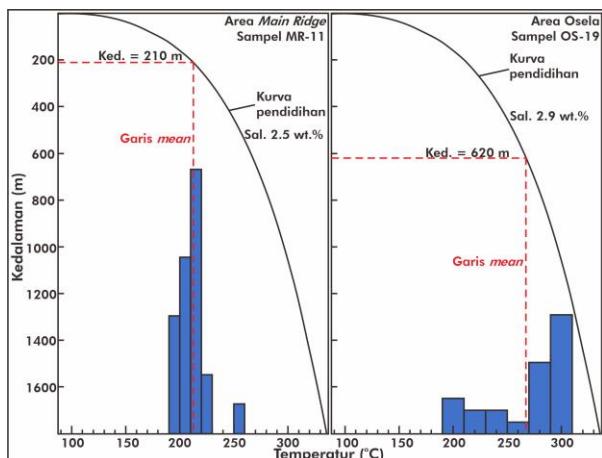
Berdasarkan data inklusi fluida endapan epitermal terbentuk pada temperatur < 150-300 °C, mulai dari dekat permukaan hingga kedalaman 1-2 km (White dan Hedenquist, 1995). Endapan hidrotermal pada area Main Ridge dan Osela dapat disebut sebagai endapan epitermal. Nilai salinitas dan Th tersebut diplot di dalam diagram tipe endapan hidrotermal yang dipublikasi oleh Wilkinson (2001). Hasil dari semua inklusi fluida masuk ke dalam tipe endapan epitermal (Gambar 14).



Gambar 14. Th dan salinitas pada area Main Ridge dan Osela masuk ke dalam tipe endapan epitermal. Diplot dalam model endapan hidrotermal (Wilkinson, 2001).

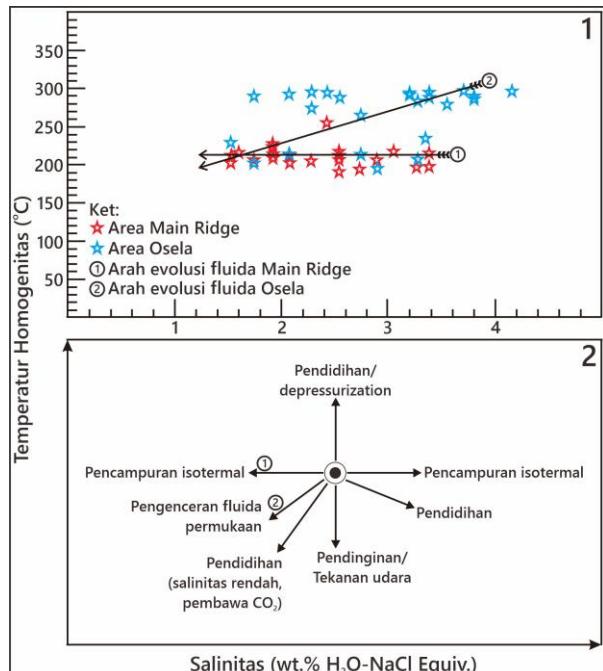
Berdasarkan Th dan salinitas dapat ditentukan posisi kedalaman masa lampau pada saat fluida hidrotermal membentuk endapan epitermal sulfidasi tinggi pada area Main Ridge dan area Osela. Penentuan kedalaman masa lampau menggunakan diagram kedalaman yang di publikasi oleh Hass (1971). Pada area Main Ridge kedalaman mineralisasi adalah 210 m, sedangkan area Osela kedalaman mineralisasi

adalah adalah 620 m (Gambar 15).



Gambar 15. Kedalaman mineralisasi pada masa lampau di area *Main Ridge* dan *Osela*.

Hubungan antara Th dengan salinitas juga dapat digunakan untuk interpretasi evolusi fluida hidrotermal pada area *Main Ridge* dan *Osela*, menggunakan diagram evolusi fluida hidrotermal Wilkinson (2001). Pada area *Main Ridge*, evolusi fluida diyakini dipengaruhi oleh pencampuran isotermal (*isothermal mixing*), artinya fluida hidrotermal bercampur dengan fluida hidrotermal lain, kemungkinan berasal dari sumber lain yang memiliki tingkat salinitas berbeda dan menyebabkan salinitas turun, namun memiliki temperatur yang relatif sama. Pada area *Osela*, proses evolusi fluida diyakini dipengaruhi oleh proses pengenceran fluida hidrotermal permukaan (*surface fluid dilution*), artinya fluida hidrotermal mengalami pengenceran fluida, diyakini karena pengaruh air meteorik dan fluida hidrotermal lain dengan salinitas dan temperatur lebih rendah, yang menyebabkan temperatur dan salinitas relatif menurun (**Gambar 16**).



Gambar 16. 1) Diagram bivariat hubungan salinitas dengan Th. Arah panah adalah arah evolusi fluida pada area penelitian. 2) Evolusi fluida pada area penelitian (Wilkinson, 2001).

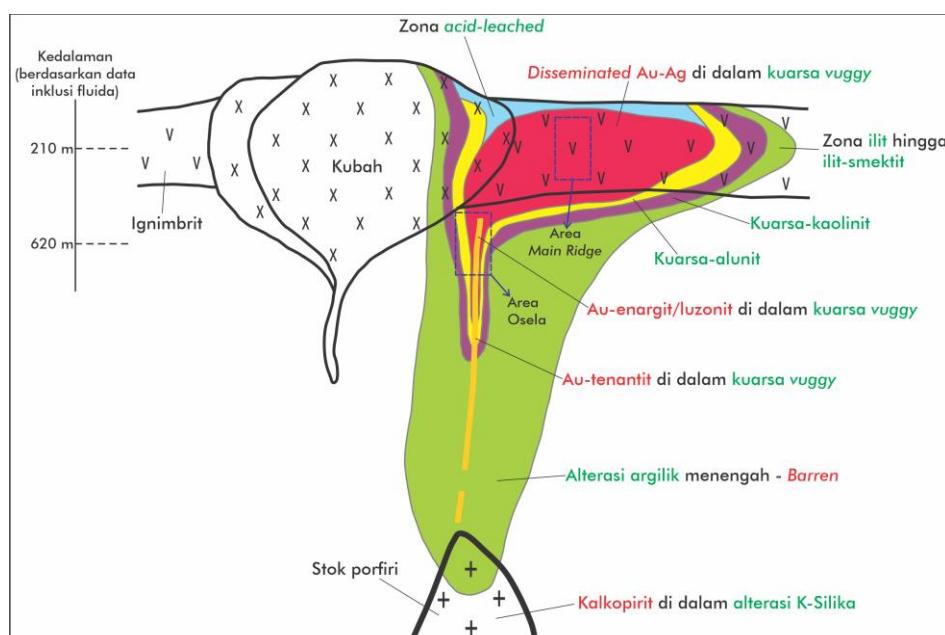
7. DISKUSI

Berdasarkan hasil paragenesis mineral dan data inklusi fluida di atas pada masing-masing area penelitian, maka dapat diinterpretasikan bahwa kedua endapan tersebut masih dikategorikan sebagai hasil suatu sistem epitermal yang terbentuk pada temperatur rata-rata 212 °C dan pada kedalaman 210 m pada area *Main Ridge*, pada area *Osela* sistem epitermal terbentuk pada temperatur rata-rata 267 °C dan pada kedalaman 620 m di bawah permukaan purba (*paleosurface*).

Pada area *Main Ridge* dapat disebut sebagai endapan epitermal sulfidasi tinggi kedalaman dangkal, mengacu pada model konseptual endapan epitermal sulfidasi tinggi oleh Sillitoe (1999). Dicirikan dengan terbentuknya tekstur *vuggy* dan munculnya mineral alterasi dominan berupa mikro granular silika dan kuarsa dari hasil silisifikasi intensif, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit, spalerit, dan sedikit tenantit-tetrahidrit, juga muncul kovelit dan kalkosit hipogen lanjut. Ciri lain berupa kandungan logam dasar dan mulia yang tersebar secara acak (*disseminated*) di dalam tubuh tuf dasitik. Hal yang cukup berbeda pada area *Osela*, diyakini pada area ini terbentuk

endapan epitermal sulfidasi kedalaman menengah-dalam. Dicirikan dengan hadirnya tekstur *vuggy*, sedikit urat sulfida, urat halus silika, dan urat kuarsa, mineral alterasi dominan berupa mikro granular silika dan kuarsa, juga terdapat sedikit alunit dan kaolinit, berasosiasi dengan mineral sulfida berupa pirit euhedral, kalkopirit, enargit-luzonit, dan sedikit tenantit-tetrahidrit, juga muncul kovelit hipogen lanjut dan kalkosit supergen. Ciri lain berupa tingginya kandungan logam mulia dan logam dasar, khususnya Au dan Cu. Mineral sulfida umumnya banyak ditemukan di dalam urat sulfida dan urat kuarsa, sebagian juga tersebar secara acak di dalam tubuh tuf dasitik (**Gambar 17**).

Berdasarkan hasil analisis geokimia, kadar logam mulai dan dasar pada area *Main Ridge* relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan area Osela. Pada area *Main Ridge* kisaran kadar Au 0.4-1 g/t, Ag 1-3 g/t, Cu 5-63 g/t, Pb 5-55 g/t, Zn 4-5 g/t, sedangkan pada area Osela Au 1-89,4 g/t, Ag 4-33 g/t, Cu 306-403 g/t, Pb 30-120 g/t, Zn 14-41 g/t, pola tersebut sesuai dengan kehadiran pirit euhedral, kalkopirit, enargit-luzonit pada area Osela dan tidak hadir pada area *Main Ridge*. Distribusi kandungan logam tersebut konsisten dengan zonasi vertikal mineral sulfida dan kandungan logam mulia dan dasar pada endapan epitermal sulfidasi tinggi yang di publikasi oleh Sillitoe (1999; **Gambar 18**).



Gambar 17. Model konseptual endapan epitermal sulfidasi tinggi (Sillitoe, 1999), zona dan mineral aterasi (tulisan warna hijau), dan mineral sulfida (tulisan warna merah). Area *Main Ridge* merupakan endapan epitermal sulfidasi tinggi kedalaman dangkal, sedangkan area Osela merupakan endapan epitermal kedalaman menengah-dalam.

Paleosurface	Tipe	Alterasi	Sulfida	Logam	
Epitermal sulfidasi tinggi dangkal	Disseminated / urat halus	Kuarsa-dickit-propilit	Kuarsa-alunit	Silisifikasi	Merkuri
Epitermal sulfidasi tinggi dalam	Sulfida masif	Kuarsa-vuggy	Bornit-digentit-kalkosit	Enargit-luzonit	Emas
Porfiri	Kuarsa-serisit		Kovelit	Tembaga	Perak

Ket:
— Umum
- - Minor

Gambar 18. Zonasi vertikal dari tipe bijih, alterasi, mineral sulfida dan distribusi logam pada area *Main Ridge* dan *Osela*. Zonasi vertikal pada endapan epitermal sulfidasi tinggi (Sillitoe, 1999).

Pada area *Main Ridge* memiliki temperatur homogenitas dan salinitas relatif lebih rendah dan kedalaman mineralisasi lebih dangkal dibandingkan dengan area *Osela*, hal ini menghasilkan mineral alterasi dan sulfida yang sebagian berbeda pada masing-masing area. Pada area *Osela* memiliki Th rata-rata 267 °C, salinitas 2.9 wt. % NaCl eq., dan kedalaman mineralisasi sekitar 620 m di bawah permukaan purba, konsisten dengan kemunculan mineral sulfida pirit euhedral, enargit-luzonit dan kalkopirit, sebaliknya ketiga mineral sulfida tersebut tidak muncul di area *Main Ridge*. Proses evolusi fluida yang berbeda pada masing-masing area menghasilkan karakteristik paragenesis mineral dan fluida hidrotermal yang berbeda.

Proses pengenceran fluida hidrotermal pada area *Osela* menyebabkan penurunan temperatur dan salinitas yang stabil, sehingga mineral sulfida yang sudah terbentuk tidak dirusak lagi oleh proses pencampuran fluida hidrotermal seperti pada area *Main Ridge*, hal tersebut diyakini menyebabkan kadar emas

pada area *Osela* relatif tinggi dibandingkan dengan area *Main Ridge*.

8. KESIMPULAN

Pada area *Main Ridge* dan *Osela*, silisifikasi dan mineralisasi terjadi pada batuan gunungapi khususnya tuf dasitik, umumnya terbentuk tekstur *vuggy*, mineralisasi tersebar secara acak (*disseminated*), sebagian terkonsensi di dalam urat halus silika dan urat sulfida terutama pada area *Osela*. Asosiasi mineral sulfida berupa pirit, spalerit, dan sedikit tenantit-tetrahidrit, kalkosit dan kovelit, mengindikasikan terbentuknya endapan epitermal sulfidasi tinggi kedalaman dangkal pada area *Main Ridge*. Pada area *Osela* mineralisasi yang terbentuk berupa pirit, kalkopirit, enargit-luzonit, dan sedikit tenantit-tetrahidrit, kovelit, dan kalkosit, yang mencirikan terbentuknya endapan epitermal sulfidasi tinggi kedalaman dalam. Kadar logam mulia dan dasar pada area *Osela* relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan area *Main Ridge*, hal tersebut konsisten dengan mineralisasi yang terbentuk pada masing-

masing area.

Pada area *Main Ridge* memiliki Th 212 °C, salinitas 2.5 wt. % NaCl eq., dan kedalaman mineralisasi 210 m, sedangkan pada area Osela memiliki Th 267 °C, salinitas 2.9 wt. % NaCl eq., dan kedalaman mineralisasi 620 m. Data inklusi menunjukkan adanya pencampuran fluida hidrotermal yang berkembang di area *Main Ridge*, sedangkan pada area Osela menunjukkan adanya pengenceran fluida hidrotermal selama proses evolusi fluida. Proses pengenceran fluida hidrotermal pada area Osela menyebabkan terbentuknya pirit euhedral, enargit-luzonit dan kalkopirit, juga menyebabkan kadar emas pada area Osela relatif tinggi dibandingkan dengan area *Main Ridge*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bodnar, R. J. (1993): Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, **57**, 683 – 684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A).
- Carlile, J. C., Digdowirogo, S., dan Darius, K. (1990): Geological setting, characteristics and regional exploration for gold in the volcanic arcs of North Sulawesi, Indonesia, *Journal of Geochemical Exploration*, **35**, 105 – 140. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90037-B](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90037-B).
- Google, n. d. [Area penambangan PT. J Resources Bolaang Mongondow]. Diunduh tanggal 30 Maret 2020 dari <https://www.google.com/maps/place/PT.+J+Resources+Bolaang+Mongondow/@0.6884485,124.3401519,11z/data=!4m8!1m2!2m1!1sPT+J+Resources+Bolaang+Mongondow!3m4!1s0x327e31953d4e3ad9:0x92fae221643caf2c!8m2!3d0.5737082!4d124.3074834>.
- Hardjana, I. (2012): The discovery, geology, and exploration of the high sulphidation Au – mineralization system in the Bakan district, North Sulawesi, *Majalah Geologi Indonesia*, **27**, 143 – 157.
- Hass, J. L. (1971): The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure, *Society of Economic Geology*, **66**, 940 – 946. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.940>.
- Saipulah (2019a): *Location map of Bakan District*, Unpublished, PT J Resources Bolaang Mongondow, Departement Mine Geology internal report.
- Saipulah (2019b): *Geological map of Main Ridge pit*, Unpublished, PT J Resources Bolaang Mongondow, Departement Mine Geology internal report.
- Saipulah (2019c): *Geological map of Osela pit*, Unpublished, PT J Resources Bolaang Mongondow, Departement Mine Geology internal report.
- Sillitoe, R. H. (1999): Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralisation in porphyry and epithermal environments, *Proceeding PACRIM '99*, Bali, Indonesia.
- van Leeuwen, T. M., dan Muhardjo. (2005): Stratigraphy and tectonic setting of the Cretaceous and Palaeogene volcanic–sedimentary successions in Northwest Sulawesi, Indonesia: Implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi, *Journal of Asian Earth Sciences*, **25**, 481 – 511. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.05.004>.
- White, N. C., dan Hedenquist, J. W. (1995): Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration, *Society of Economic Geologists Newsletter* **23**, 1, 9 – 13.
- Wilkinson, J. J. (2001): Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, **55**, 229 – 272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).