



Paragenesis Mineral Bijih pada Endapan Epitermal Sulfidasi Tinggi Area Gunung Budheg, Kabupaten Tulungagung, Provinsi Jawa Timur
Ore Mineral Paragenesis on High-Sulfidation Epithermal Deposits in the Mount Budheg Area, Campurdarat District, Tulungagung Regency, East Java Province

Septyo Uji Pratomo*)

*)Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral,

Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Jalan Padjajaran (Ring Road Utara) No.104, Condongcatur, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

email: septyo.uji@upnyk.ac.id

Naskah diterima: 02 Juni 2022, Revisi terakhir: 19 Januari 2024, Disetujui: 05 Maret 2024 Online: 06 Mei 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i2.772>

Abstrak- Di daerah Gunung Budheg ditemukan *vuggy silica* dan batuan teralterasi argilik-argilik lanjut di sekitar daerah penelitian dengan kandungan Au (emas) tertinggi mencapai 1.476 dan Cu (tembaga) mencapai 2,767% Cu yang diinterpretasikan sebagai salah satu penciri endapan epitermal sulfidasi tinggi. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui paragenesis mineral yang membentuk endapan epitermal sulfidasi tinggi. Lokasi penelitian ini terletak di daerah Gunung Budheg, Kecamatan Campurdarat, Kabupaten Tulungagung, Provinsi Jawa Timur. Metode penelitian yang digunakan antara lain: pengamatan megaskopis pada sampel batuan setangan (*hand specimen*) dan sampel *slab*, pengamatan mikroskopi bijih, dan geokimia (FA-AAS). Endapan epitermal sulfidasi tinggi pada area ini dicirikan dengan adanya tekstur *vuggy* pada zona silisifikasi yang terisi oleh mineral-mineral sulfida dengan tahap paragenesis: tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), kalkopirit (CuFeS_2), pirit (FeS_2), bornit (Cu_3FeS_4), dan galena (PbS), serta kovelit (CuS) yang terbentuk pada tahap akhir sebagai hasil oksidasi yang berasosiasi dengan hematit. Hasil geokimia pada area ini menunjukkan kadar logam: Au berkisar antara 0,03—2,45 ppm, Ag <0,5—19 ppm, Cu 19—148 ppm, Pb <5—1.520 ppm, dan Zn <5—520 ppm. Hasil analisis geokimia menunjukkan bahwa kelimpahan Cu relatif meningkat seiring dengan keberadaan mineral kalkopirit pada pengamatan mikroskopis. Karakteristik dan kedalaman pembentukan endapan di daerah penelitian berada pada kedalaman relatif intermediet—dangkal (<500—1.000 m) atau berada lebih dekat ke permukaan (zona distal).

Katakunci: Epitermal sulfidasi tinggi, Gunung Budheg, paragenesis mineral, Tulungagung.

Abstract- In the Mount Budheg area, further argillic-argillic altered rocks and *vuggy silica* were found around the research area, with the highest Au (gold) content reaching 1,476 and Cu (copper) reaching 2.767% Cu, which is interpreted as one of the characteristics of high sulfidation epithermal deposits. This study aimed to determine the paragenesis of minerals that formed high-sulfidation epithermal deposits. The research location is in the Mount Budheg area, Campurdarat District, Tulungagung Regency, East Java Province. The research method used: megascopic observations on rock and slab samples, ore microscopy, and geochemistry (FA-AAS). High sulfidation epithermal deposits in this area are characterized by the presence of a *vuggy* texture in the silicification zone filled with sulfide minerals with paragenesis stages: tetrahedrite ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), pyrite (FeS_2), chalcopyrite (CuFeS_2), bornite (Cu_3FeS_4), and galena (PbS), as well as covellite (CuS), formed in the final stage as a result of oxidation associated with hematite. Geochemical results in this area show metal levels: Au ranging from 0.03-2.45 ppm, Ag <0.5-19 ppm, Cu 19-148 ppm, Pb <5-1,520 ppm, and Zn <5-520 ppm. The results of the geochemical analysis showed that the abundance of Cu from the microscopic observation relatively increased with the presence of chalcopyrite. The characteristics and depth of deposit formation in the study area are relatively intermediate-shallow (<500-1,000 m) or closer to the surface (distal zone).

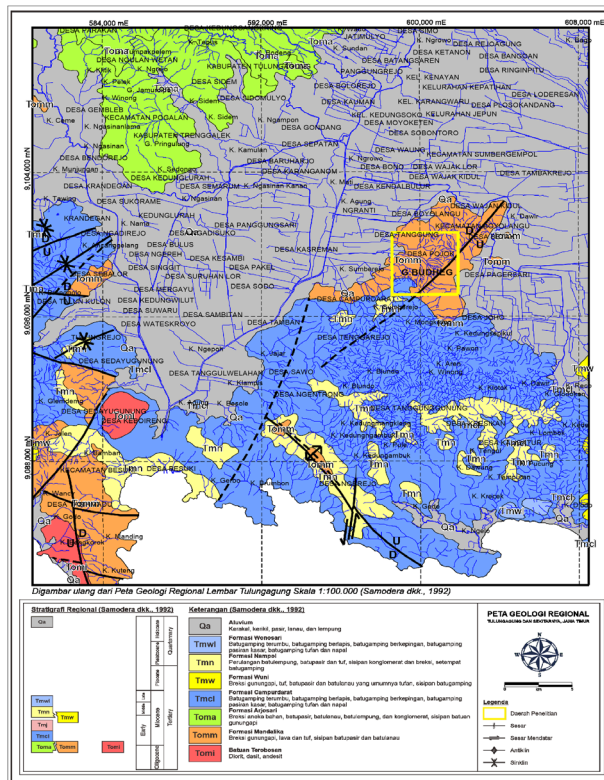
Keywords: High sulphidation epithermal, Mount Budheg, mineral paragenesis, Tulungagung.

PENDAHULUAN

Area Gunung Budheg, Tulungagung, Provinsi Jawa Timur adalah salah satu area dengan potensi endapan epitermal sulfidasi tinggi (Ali dkk., 2020). Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Widodo (2003) menghasilkan temuan berupa float batuan tuf teralterasi argilik dengan urat-urat tipis limonitik di daerah perbatasan Kecamatan Kalidawir, Kecamatan Tanggunggunung dan Kecamatan Campurdarat dengan kadar 948-1.476 ppb Au, 344 Hg, dan 298 ppm As, serta ditemukannya singkapan batuan teralterasi argilik di hulu Sungai Secang dan singkapan urat kuarsa termineralisasi pirit pada batuan teralterasi argilik di Sungai Jinggring. Widodo & Simanjuntak (2002) menemukan indikasi mineralisasi dengan endapan polimetalik, ditunjukkan dengan adanya anomali pada Au sedimen sungai dan ubahan batuan yang didominasi oleh argilik-argilik lanjut dengan hasil analisis kimia batuan menunjukkan kandungan 4.950 ppb Au, 2,767% Cu, dan 2.081-2.555 ppm Hg, di area prospek Seweden-Ngeni, Kecamatan Wonotirto, Kabupaten Blitar yang ditemukan pada Formasi Mandalika yang merupakan formasi yang sama dengan daerah penelitian.

Samodera dkk. (1992) menjelaskan bahwa daerah

Tulungagung dan sekitarnya dari tua ke muda tersusun oleh formasi-formasi sebagai berikut: Formasi Mandalika (Tomm), Formasi Arjosari (Toma), Batuan Terobosan (Tomi), Formasi Campurdarat (Tmcl), Formasi Wuni (Tmw), Formasi Nampol (Tmn), dan Aluvium (Qa) (Gambar 1). Formasi Mandalika (Tomm) terdiri dari breksi gunungapi, lava, dan tuf, sisipan batupasir dan batulanau, berumur Oligosen Akhir - Miosen Awal (Winudharta, 2021). Formasi Arjosari (Toma) terdiri dari breksi aneka bahan, batulanau, batulempung, dan konglomerat, sisipan batuan gunungapi, berumur Oligosen Akhir - Miosen Awal. Batuan Terobosan (Tomi) terdiri dari diorit, dasit, dan andesit, berumur Oligosen Akhir - Miosen Awal (Kurniadi, 2016; Nayoan dkk., 2017; Sunan dkk., 2021). Formasi Campurdarat (Tmcl) yang terdiri dari batugampkristalin dan batulempung berkarbon, berumur Miosen Awal. Formasi Wuni (Tmw) terdiri dari breksi gunungapi, tuf, batupasir dan batulanau yang umumnya tufan, sisipan batugamping, berumur Miosen Awal - Tengah. Formasi Nampol (Tmn) terdiri dari perulangan batulempung, batupasir dan tuf, sisipan konglomerat dan breksi, setempat batugamping berumur Miosen Tengah. Aluvium terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lanau, dan lempung berumur Holosen.



Sumber: Samodera dkk. (1992)

Gambar 1. Bagian timur dari peta geologi regional Lembar Tulungagung (peta digambar ulang dari Samodera dkk., 1992, legenda dan satuan batuan diduplikasi dari Samodera dkk., 1992). Posisi daerah penelitian berada dalam kotak berwarna kuning.

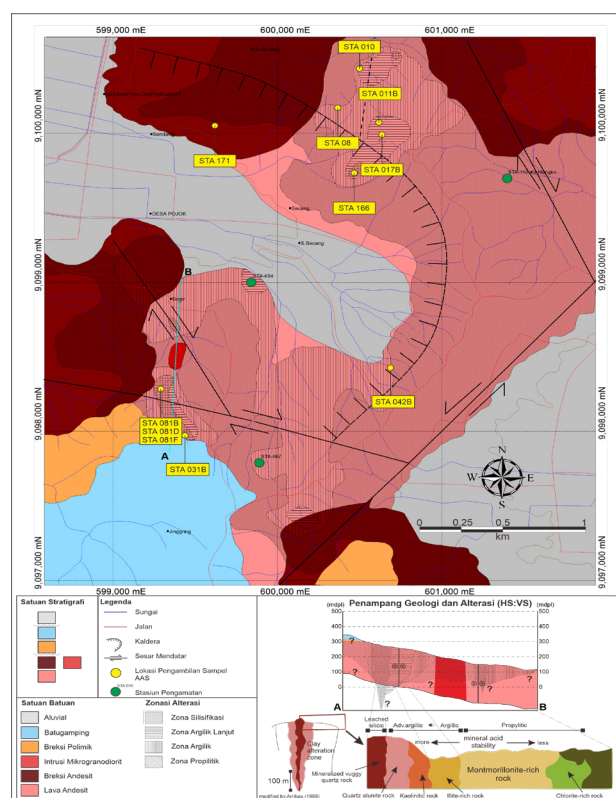
Kondisi geologi secara lebih detail dijelaskan oleh Pratomo dkk. (2020) dan Kurniadi (2016), bahwa daerah Gunung Budheg dan sekitarnya terdiri dari beberapa satuan batuan antara lain: satuan breksi andesit dan satuan lava andesit Formasi Mandalika yang diterobos oleh satuan mikrogranodiorit, kemudian diendapkan secara tidak selaras di atasnya satuan breksi polimik dan satuan batugamping terumbu Formasi Campurdarat, serta satuan aluvial berumur Resen. Sunan dkk. (2021) menunjukkan bahwa daerah Gunung Budheg dan sekitarnya dilewati sesar-sesar mendatar antara lain: sesar dengan orientasi timurlaut-baratdaya (NE-SW) di sebelah timur area penelitian, diikuti oleh sesar mendatar mangan dengan orientasi baratbaratlaut-timurtenggara (NWW-SEE) dan baratlaut-tenggara (NW-SE) sebagai penyerta, dan kelurusan berarah relatif utara-selatan (lihat Gambar 2). Hampir seluruh satuan batuan vulkanik di area penelitian telah mengalami alterasi dengan zona silisifikasi sebagai pusat zona alterasi pada satuan lava andesit, seperti dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Zona alterasi yang terbentuk di area penelitian dari luar ke pusat yaitu: zona propilitik yang terdiri dari kuarsa-klorit-karbonat-smektit, zona argilik yang terdiri dari kuarsa-kaolinit-ilit-smektit-diaspor, zona argilik lanjut yang terdiri dari kuarsa-kaolinit-alunit-pirofilit-diaspor-ilit-smektit dan zona silisifikasi dengan urat-urat kuarsa bertekstur *vuggy* (Gambar 3(a)-(e)). Tekstur *vuggy* pada silika tersebut terisi oleh mineral sulfida yang dapat teramati secara makroskopis antara lain: pirit (Fe_2S), kalkopirit ($CuFeS_2$), bornit (Cu_5FeS_4), dan galena (PbS) (Gambar 4(a)-(d)). Berdasarkan model penyebaran zona alterasi dan tekstur silika *vuggy* yang sangat khas, area penelitian termasuk ke dalam endapan epitermal sulfidasi tinggi (Arribas, 1995).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui paragenesis atau urutan pembentukan mineral sulfida yang telah ditemukan di bagian pusat zona alterasi, yang membentuk endapan epitermal sulfidasi tinggi berdasarkan data asosiasi mineral yang ditemukan di area penelitian melalui pengamatan secara mikroskopis mineral-mineral bijih di dalam sayatan poles. Penelitian ini juga didukung dengan data geokimia untuk mengetahui kadar Au, Ag, Cu, Pb, dan Zn melalui metode FA-AAS untuk mengetahui korelasinya dengan keberadaan mineral-mineral sulfida yang terdapat di daerah tersebut.

SAMPEL DAN METODOLOGI

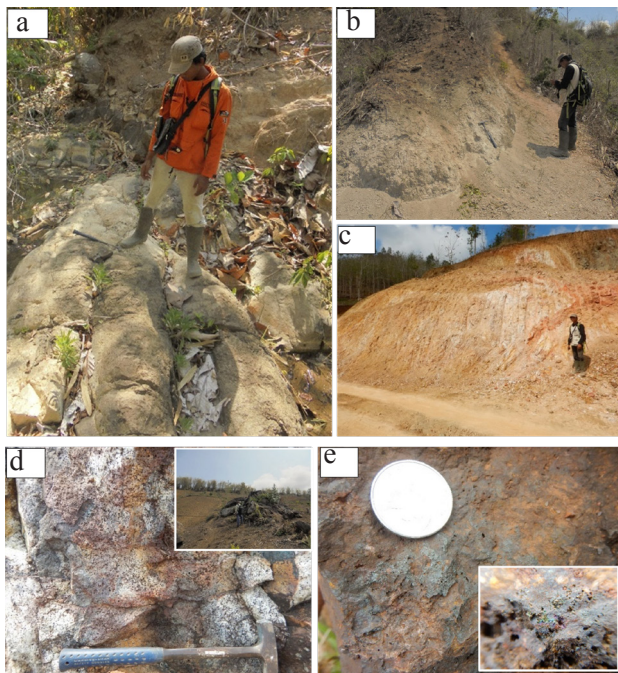
Sampel yang diambil pada area penelitian merupakan sampel batuan tersilisifikasi (urat kuarsa) bertekstur

vuggy, terisi oleh mineral sulfida sejumlah 11 sampel. Sampel tersebut kemudian dibuat *slab* untuk memperlihatkan kenampakan tekstur urat kuarsa dan kenampakan mineral bijih secara lebih jelas dalam skala makroskopis. Terdapat bagian dari sampel yang dibuat sayatan poles dan dianalisis dengan menggunakan mikroskop refleksi untuk mengetahui kenampakan tekstur mineral bijih serta mengidentifikasi paragenesis dari mineral bijih tersebut berdasarkan bentuk dan hubungan antar mineral yang berkaitan dengan kelimpahan masing-masing mineral bijih pada tiap tahapan mineralisasi. Kemudian, bagian lain dari sampel yang dianalisis geokimia dengan menggunakan metode FA-AAS (*fire assay-atomic absorption spectrometry*) untuk mengetahui kadar Au, Ag, Cu, Pb dan Zn dalam ppm atau ppb (lokasi pengambilan sampel geokimia dapat dilihat pada Gambar 2). Analisis geokimia ini dilakukan di Laboratorium Divisi Mineral PT.Geoservices Ltd.



Sumber: Pratomo dkk. (2020)

Gambar 2. Overlay peta geologi dan peta zonasi alterasi daerah Gunung Budheg (Pratomo dkk, 2020), menunjukkan satuan breksi andesit dan lava andesit yang diterobos oleh satuan mikrogranodiorit. Satuan breksi polimik, satuan batugamping, dan aluvial diendapkan tidak selaras di atasnya. Struktur geologi berupa sesar utama berarah NE-SW di bagian timur, sesar-sesar berarah NWW-SEE dan NW-SE di bagian utara dan barat sebagai penyerta. Model zonasi alterasi daerah penelitian adalah model tipe endapan epitermal sulfidasi tinggi (Arribas, 1995).



Gambar 3. Litologi dan alterasi di daerah penelitian, lokasi stasiun pengamatan (STA) dapat dilihat pada Gambar 2); (a) Satuan andesit teralterasi propilitik pada STA-112, (b) Satuan andesit teralterasi argilik pada STA-067, (c) Satuan andesit teralterasi argilik lanjut pada STA-054, (d) dan (e) Kenampakan satuan andesit tersilisifikasi pada STA-081 dengan tekstur vuggy yang terisi mineral sulfida yang dapat teramati: pirit, kalkopirit, galena, dan bornit.

LITOLOGI, MINERALOGI, DAN KADAR LOGAM

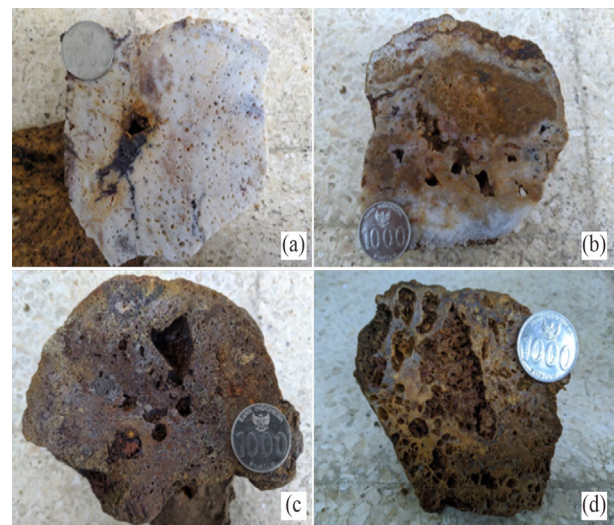
Pengambilan sampel *slab* di daerah penelitian didominasi oleh kuarsa dengan tekstur *vuggy* dengan derajat oksidasi yang bervariasi dari rendah s.d. total (Gambar 4(a)-(d)). Pada sampel *vuggy quartz* teroksidasi rendah, mineralisasi sulfida yang muncul antara lain: pirit (FeS_2), dengan bentuk rongga-rongga (*vugs*) yang relatif kecil dan jarang (Gambar 4(a)). Pada sampel *vuggy quartz* yang teroksidasi lebih intensif oleh hematit, vugs yang muncul relatif lebih besar dan banyak diikuti oleh mineral sulfida: pirit (FeS_2), kalkopirit (CuFeS_2), bornit (Cu_3FeS_4), dan galena (PbS) (Gambar 4(d)). Hasil pembuatan slab dari beberapa sampel yang menampakkan variasi tekstur urat kuarsa, intensitas derajat oksidasi, dan mineralisasi sulfida yang dapat diamati secara makroskopis ditunjukkan oleh Gambar 4 (a)-(d). Sementara itu, hasil pengamatan secara mikroskopis dari sayatan poles yang menunjukkan kenampakan mineral-mineral sulfida antara lain: tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), kalkopirit (CuFeS_2), pirit (FeS_2), bornit (Cu_3FeS_4), dan galena (PbS), serta kovelit (CuS) akan dibahas pada sub-bab berikutnya.

Analisis geokimia bijih dengan metode FA-AAS dilakukan pada semua sampel untuk mengetahui

banyaknya kandungan unsur logam: Au, Cu, Ag, Pb, dan Zn. Hasil analisis sampel tersebut disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis geokimia bijih dari 11 sampel yang diujikan dengan metode FA-AAS

No Sampel	Kadar Unsur				
	Au (ppm)	Ag (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
STA-08	0,16	3,62	58	9	11
STA-010	0,89	1,52	20	5	38
STA-011B	2,45	2,03	32	6	15
STA-017B	0,3	19	148	1520	520
STA-031B	0,34	0,5	100	10	22
STA-042B	0,09	5,59	74	70	123
STA-081B	0,11	0,85	41	8	7
STA-081D	0,04	<0,5	30	29	7
STA-081F	0,22	<0,5	19	46	7
STA-166	0,07	1,56	16	<5	42
STA-171	0,03	0,98	28	19	59



Gambar 4. Hasil slab yang menampakkan variasi tekstur urat kuarsa, intensitas oksidasi, dan mineralisasi sulfida yang dapat diamati secara makroskopis; (a) Vuggy quartz dengan intensitas oksidasi rendah pada STA-081A, mineralisasi sulfida yang dapat diamati: pirit dengan vugs yang relatif kecil dan jarang. (b) Vuggy quartz dengan intensitas oksidasi sedang pada STA-017, mineralisasi sulfida yang dapat diamati: pirit, kalkopirit, galena. (c) Vuggy quartz dengan intensitas oksidasi tinggi pada STA-081D, mineralisasi sulfida yang dapat diamati: pirit dan bornit dengan vugs berukuran lebih besar. (d) Vuggy quartz dengan intensitas oksidasi total pada STA-031B, mineralisasi sulfida yang dapat diamati: pirit dan kalkopirit.

PARAGENESIS MINERAL

Penjelasan mengenai tekstur, bentuk, dan hubungan pertumbuhan antar mineral bijih di area penelitian didasarkan pada hasil pengamatan sayatan poles secara mikroskopis (Gambar 5(a)—(g), disajikan sebagai berikut:

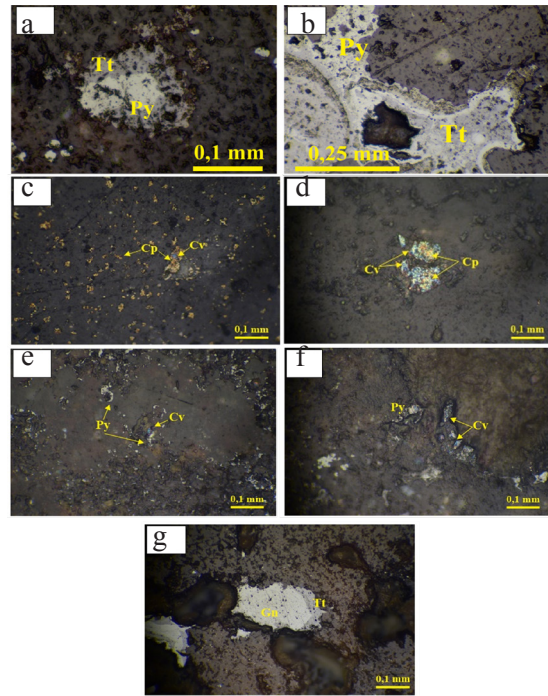
Tetrahedrit ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$) dan pirit (FeS_2). Dari gambar 5(a) pada sampel STA-081F dapat dilihat bahwa terlebih dahulu terbentuk tetrahedrit, yang kemudian digantikan oleh pirit melalui tekstur penggantian (*replacement*), sebagaimana tampak pada batas mineral pirit yang terlihat tegas di dalam rim tetrahedrit. Selain itu, pirit juga dapat muncul melalui tekstur pengisian rekahan (*filling*) pada celah-celah tetrahedrit, yang dapat dilihat pada gambar 5(b) pada sampel STA-081E.

Kalkopirit ($CuFeS_2$) dan kovelit (CuS). Dari gambar 5(c) pada sampel STA-031B dan gambar 5(d) pada STA-017B dapat diamati bahwa kalkopirit terbentuk terlebih dahulu, kemudian diikuti dengan terbentuknya kovelit melalui proses penggantian mineral (*replacement*).

Pirit (FeS_2) dan kovelit (CuS). Dari Gambar 5(e) pada sampel STA-081D, dapat dilihat bahwa pirit terbentuk terlebih dahulu, diikuti dengan terbentuknya kovelit melalui proses penggantian mineral (*replacement*). Selain itu, kovelit juga dapat ditemukan melalui proses pengisian rekahan pada bidang belahan pirit, seperti yang terlihat pada Gambar 5(f) pada sampel STA-081E.

Tetrahedrit ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$) dan galena (PbS). Dari Gambar 5(g) pada sampel STA-081F dapat dilihat bahwa terlebih dahulu terbentuk tetrahedrit, kemudian dipotong oleh galena. Hal ini dapat diamati dari batas mineral galena yang sangat jelas terlihat di dalam tetrahedrit.

Urutan pembentukan mineral bijih tersebut kemudian dikelompokkan berdasarkan kelimpahan dan keterdapatannya yang mencerminkan proses, tempat, dan waktu pembentukannya. Semakin ke arah kanan pada tabel menunjukkan semakin akhir waktu pembentukannya. Pada area penelitian, terdapat dua tahap pembentukan mineral bijih, yaitu tahap hipogen dan supergen. Tahap hipogen terjadi terlebih dahulu pada *vuggy quartz* di zona silisifikasi, diikuti oleh tahap supergen yang mengoksidasi mineral bijih yang terbentuk sebelumnya (Tabel 2).



Gambar 5(a) Fotomikrografi sampel STA-081E yang menunjukkan pirit mengisi rekahan pada bukaan tetrahedrit. (b) Sampel STA-081F, menunjukkan batas mineral yang jelas pada rim tetrahedrit, menunjukkan pirit menggantikan tetrahedrite. Sampel STA-031B (c) dan STA-017B (d) yang menunjukkan batas mineral yang jelas pada kalkopirit, menunjukkan kovelit menggantikan kalkopirit. (e) Sampel STA-081D yang menunjukkan batas mineral pada pirit, menunjukkan kovelit menggantikan pirit. (f) Sampel STA-081E yang menunjukkan kovelit mengisi rekahan pada bidang belahan pirit. (g) Sampel STA-081 menunjukkan galena menggantikan tetrahedrit yang menunjukkan batas mineral yang jelas. Keterangan: Gn: galena, Tt: tetrahedrite, Py: pirit, Cv: kovelit, Cp: kalkopirit.

Tabel 2. Paragenesis dan kelimpahan mineral bijih pada *vuggy quartz* di area penelitian

Mineral Bijih	Hipogen		Supergen
	Awal	Akhir	
Tetrahedrit	————		
Galena	————		
Pirit	————	————	
Kalkopirit	————		
Bornit		
Kovelit		
Hematit			————

———— : sangat melimpah—cukup melimpah
 ———— : sedikit melimpah
 : jarang ditemukan

DISKUSI

Menurut Corbett & Leach (1997), terdapat beberapa faktor pengontrol pada endapan epitermal sulfidasi tinggi, seperti endapan epitermal yang berkaitan dengan intrusi porfiri, endapan epitermal yang dipengaruhi oleh litologi, endapan epitermal yang dipengaruhi oleh struktur geologi, dan endapan epitermal yang dipengaruhi oleh litologi serta struktur geologi. Pada area penelitian, mineralisasi terjadi hanya di zona silisifikasi dan sedikit berkembang di zona alterasi argilik lanjut dan zona argilik. Zona alterasi dan mineralisasi tidak berkembang sepanjang sesar-sesar mendatar baratdaya-timurlaut di bagian timur area (Gambar 2). Hal ini menunjukkan bahwa fluida hidrotermal yang berinteraksi dengan batuan sampling dan membentuk zona alterasi dan mineralisasi tidak melintasi zona sesar berarah baratdaya-timurlaut tersebut dan hanya terfokus pada kelurusan-kelurusan di bagian utara dan selatan.

Setelah didapatkan kadar unsur logam melalui analisis geokimia (Tabel 1), kemudian dikorelasikan dengan data himpunan mineral sulfida yang didapatkan melalui pengamatan mikroskopis dari sayatan poles (Tabel 2 dan Gambar 5). Hasil korelasi antara Tabel 1, Tabel 2, dan Gambar 5 adalah sebagai berikut: Pada sampel STA-017B ditemukan kandungan Au sebesar 0,3 ppm; Ag 19 ppm; Cu 148 ppm; Pb 1520 ppm; dan Zn 520 ppm. Dalam sayatan poles yang terlihat pada sampel tersebut (Gambar 5(d)), terdapat mineral sulfida seperti galena (PbS), kalkopirit (CuFeS_2), kovelit (CuS), dan pirit (FeS_2). Demikian pula pada sampel STA-031B, kandungan Au sebesar 0,34 ppm; Ag 0,5 ppm; Cu 100 ppm; Pb 10 ppm; dan Zn 22 ppm. Mineral sulfida yang teramati dalam sayatan poles meliputi tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), kalkopirit (CuFeS_2), kovelit (CuS), dan pirit (FeS_2) (Gambar 5(c)). Sedangkan pada sampel STA-081, kandungan Au berkisar antara 0,04-0,22 ppm; Ag <0,5-0,85 ppm; Cu 19-41 ppm; Pb 8-46 ppm; dan Zn 7 ppm. Dalam sayatan poles, mineral sulfida yang ditemukan adalah tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), bornit (Cu_5FeS_4), kovelit (CuS), dan pirit (FeS_2), seperti terlihat pada Gambar 5 (a), (b), (e), (f), (g). Dari penjelasan tersebut dapat diketahui bahwa kelimpahan Cu relatif meningkat pada sampel STA-017B dan STA-031B seiring dengan keterdapatannya kalkopirit yang dapat diamati oleh analisis sayatan poles.

Hasil pengamatan mineralisasi bijih di daerah penelitian melalui analisis sayatan poles antara lain: tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), kalkopirit (CuFeS_2), kovelit (CuS), pirit (FeS_2), bornit (Cu_5FeS_4), dan galena (PbS). Mineral-mineral ini terdapat pada zona silisifikasi yang memiliki tekstur *vuggy quartz*, dan

terbentuk melalui pengisian rongga dan celah. Pada zona alterasi argilik lanjut-argilik, mineralisasi pirit sangat jarang ditemukan karena sifat dari mineral lempung pada zona alterasi tersebut yang bersifat impermeabel. Berdasarkan tabel paragenesis mineral sulfida (Tabel 2), tetrahedrit terbentuk terlebih dahulu, kemudian diikuti oleh pirit dan galena melalui penggantian tekstur. Setelah itu, kovelit terbentuk setelah pirit dan kalkopirit. Meskipun demikian, hubungan antara pirit, galena, dan kalkopirit tidak dapat dijelaskan melalui analisis sayatan poles pada sampel yang diambil di area penelitian.

Corbett & Leach (1997) menjelaskan bahwa endapan epitermal sulfidasi tinggi membentuk mineralisasi sulfida pada silika *vuggy* yang terbentuk akibat fase *vapour rich*. Mineral sulfida ini ditemukan bersamaan dengan mineral sulfat seperti alunit/barit. Proses pengendapan mineral dimulai dengan sulfat, kemudian besi sulfida, dan akhirnya tembaga sulfida. Pirit merupakan besi sulfida utama yang terbentuk pada semua kedalaman dalam sistem endapan epitermal sulfidasi tinggi. Mineral sulfida ini juga mengalami gradasi, dimulai dari tembaga sulfida di zona pusat sistem (zona kuarsa) hingga besi sulfida di zona argilik lanjut atau zona argilik yang lebih jauh dari pusat sistem. Pirit (FeS_2) juga memiliki jangkauan suhu pembentukan yang luas dan sering ditemukan di endapan sulfidasi epitermal tinggi. Mineral enargit-luzonit bergradasi menjadi tennantit dan kemudian kalkopirit di dekat permukaan. Galena dan sfalerit muncul pada zona yang kaya akan mineral lempung, yaitu pada batas inti zona kuarsa-alunit.

Pada daerah penelitian, tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) diinterpretasikan sebagai polimorf dari tennantit ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$). Tetrahedrit di daerah penelitian terbentuk lebih awal daripada pirit berdasarkan tabel paragenesis (Tabel 2). Pembentukan mineral ini diinterpretasikan sebagai gradasi dari enargit-luzonit (Cu_3AsS_4) berdasarkan penjelasan dari Corbett & Leach (1997). Tennantit/tetrahedrit dapat berubah menjadi kalkopirit (CuFeS_2) pada zona-zona di dekat permukaan, yang diinterpretasikan bahwa mineral ini terbentuk sebelum kalkopirit. Bornit (Cu_5FeS_4) diinterpretasikan terbentuk di tahap awal pada daerah yang masih dekat dengan inti zona kuarsa, sedangkan galena (PbS) diinterpretasikan muncul pada zona yang kaya akan mineral lempung di batas inti zona kuarsa-alunit, yaitu zona terluar pada tahap awal pembentukan himpunan mineral ini menurut Corbett & Leach (1997). Sementara itu, kovelit (CuS) yang menggantikan pirit dan kalkopirit diinterpretasikan sebagai hasil oksidasi yang berasosiasi dengan hematit dan terbentuk paling akhir.

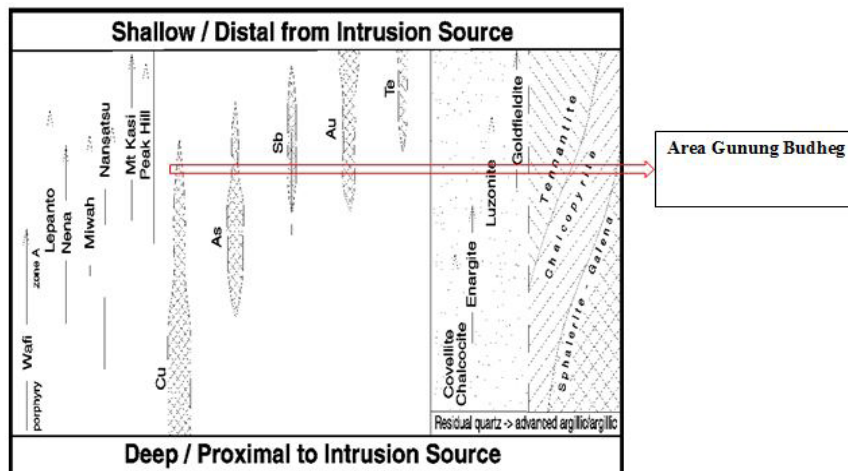
Tabel 3 menurut Hedenquist dkk. (2020) menunjukkan kesesuaian dari beberapa parameter di area penelitian, menunjukkan karakteristik endapan epitermal sulfidasi tinggi bertipe intermediet dan dangkal yang ditandai dengan huruf bercetak tebal. Area penelitian diinterpretasikan sebagai ciri endapan epitermal sulfidasi tinggi berkarakteristik intermediet hingga dangkal (terbentuk pada kedalaman <500 m s.d. 1.000 m). Pendekatan lain untuk menentukan karakteristik dan kedalaman pembentukan endapan epitermal sulfidasi tinggi di daerah penelitian dilakukan melalui

data dan interpretasi yang didapatkan, kemudian dibandingkan dengan literatur lainnya dengan menggunakan model endapan epitermal sulfidasi tinggi menurut Corbett & Leach (1997) pada Gambar 6. Dari penjelasan pada Gambar 6 tersebut, area penelitian berada lebih dekat ke permukaan (zona distal) daripada sumber intrusi (zona proksimal) berdasarkan distribusi logam dan tembaga sulfida yang ditemukan. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman pembentukan endapan di daerah penelitian berada pada kedalaman relatif intermediet hingga dangkal.

Tabel 3. Karakteristik endapan epitermal sulfidasi tinggi (modifikasi Hedenquist dkk., 2000) dan perbandingannya dengan karakteristik pembentukan endapan epitermal sulfidasi tinggi di area penelitian

	Dangkal	Intemediet	Dalam
Kedalaman	<500 m	500 m s.d. 1.000 m	>1.000 m
Host rock	Dome, piroklastik, batuan sedimen	Dome, diatrema, batuan vulkanik	Dome-diatrema, porfiri, batuan vulkanik, batuan vulkaniklastik
Asosiasi batuan vulkanik		Andesit—riodasit, afinitas kalk alkali	
Bentuk endapan	Terdiseminasi, breksi, veinlet	Urut sulfida masif, breksi, veinlet	Terdiseminasi, veinlet, breksi
Tekstur bijih	Silika vuggy	Sulfida masif, urat/breksi	Penggantian (replacement)
Alterasi	Silisik (vuggy), kuar-sa-alunit	Silisik (vuggy), kuarsa-alunit, pirofilit-dickit-serisit	Pirofilit-serisit, kuarsa-serisit
Mineral gangue	Alunit, barit, kaolinit	Anhidrit, kaolinit, dikit	Serisit, pirofilit
Mineral sulfida	Enargit/luzonit, kovelit, pirit	Enargit/luzonit, kalkopirit, tetrahedrit/tennantit, sfalerit, kovelit (akhir), pirit	Bornit, digenit, kalkosit, pirit

Sumber: Hedenquist dkk. (2000).



Sumber: Corbett & Leach (1997).

Gambar 6. Pembagian zona logam dan tembaga sulfida dalam endapan epitermal sulfidasi tinggi (Corbett & Leach, 1997) dan perbandingannya dengan kisaran area pembentukan endapan epitermal sulfidasi tinggi di area penelitian (kotak merah).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil kesimpulan bahwa mineral bijih seperti tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), kalkopirit (CuFeS_2), kovelit (CuS), pirit (FeS_2), bornit (Cu_5FeS_4), dan galena (PbS) terdapat pada zona silisifikasi yang memiliki tekstur *vuggy quartz*, terbentuk melalui pengisian rongga dan celah. Paragenesis mineral bijih di daerah penelitian dari tahap awal sampai akhir adalah sebagai berikut: tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), pirit (FeS_2), kalkopirit (CuFeS_2), bornit (Cu_5FeS_4), dan galena (PbS) yang terbentuk di tahap

hipogen, kovelit (CuS) terbentuk di tahap supergen sebagai hasil oksidasi yang berasosiasi dengan hematit. Hasil analisis geokimia menunjukkan bahwa kelimpahan Cu relatif meningkat seiring dengan keberadaan mineral kalkopirit yang didapatkan dari hasil analisis sayatan poles. Berdasarkan kondisi geologi dan himpunan mineral bijih, karakteristik dan kedalaman pembentukan endapan epitermal sulfidasi tinggi di daerah penelitian berada pada kedalaman relatif intermediet hingga dangkal (<500-1.000 m) atau berada lebih dekat ke permukaan (zona distal).

ACUAN

- Ali, R.K., Winarno, T., dan Jamalulail, M.A., 2020. Karakteristik Alterasi dan Mineralisasi Tipe Epitermal Daerah Gunung Budheg dan Sekitarnya, Tulungagung, Jawa Timur. *Eksplorium*, 41(1), 1–14.
- Arribas, A.R., 1995. Characteristics of High-Sulfidation Epithermal Deposits, and Their Relation to Magmatic Fluids. Mineralogical Association of Canada *Short Course Series: Magmatic, Fluids, and Ore Deposits*, 23, 419-454.
- Corbett, G.J. and Leach, T.M., 1997. *Southwest Pacific Gold – Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization*. CMS New Zealand Ltd, Short Course Manual, Auckland, New Zealand.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R., and Gonzales-Urien, E., 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. *SEG Reviews Economic Geology*, 13, 245–277.
- Kurniadi, F. 2016. Laporan Pemetaan Geologi Daerah Besuki dan Sekitarnya, Kecamatan Besuki, Kabupaten Tulungagung, Provinsi Jawa Timur (laporan Universitas Trisakti, tidak terbit).
- Nayoan, A.G.P., Sammuel, E.R., dan Kurniadi, F., 2017. Analisa Potensi Sumber Daya dan Kebencanaan Geologi Desa Besuki, Kabupaten Tulungagung, Jawa Timur. *Seminar Nasional Cendekiawan Ke-3*, 1, 33-39.
- Pratomo, S.U., Titisari, A.D., and Idrus, A., 2020. Hydrothermal Alteration of High Sulfidation Epithermal Deposits in Secang Area, Tulungagung, East Java, Indonesia. *Journal of Applied Geology*, 5(2), 73-83.
- Samodera, H., Suharsono, Gafoer, S., dan Suwanti, T., 1992. *Peta Geologi Lembar Tulungagung, skala 1:100.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Sunan, H.L., Pratomo, S.U., Yudhistira, I.K., dan Eman, B.N., 2021. Pengaruh Sesar Pagersari Terhadap Kemunculan Intrusi Mikrogranodiorit. *Prosiding Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan (SEMINTAN)*, 3(1), 206-214.
- Widodo, W., dan Simanjuntak, S. 2002. Hasil Kegiatan Eksplorasi Mineral Logam Kerjasama Teknik Asing Daerah Pegunungan Selatan Jawa Timur (JICA/MMAJ – Jepang) dan Cianjur (KIGAM - Korea): Kolokium *Direktorat Inventarisasi Sumberdaya Mineral (DIM) Bandung*.
- Widodo, W. 2003. Inventarisasi Bahan Galian Logam di Kab.Malang dan Kab.Lumajang dan Eksplorasi Lanjutan Mineralisasi Logam di Daerah Tempursari (Kab.Lumajang), Seweden (Kab.Blitar), dan Suren Lor (Kab. Trenggalek), Prov Jawa Timur: *Kolokium Direktorat Inventarisasi Sumberdaya Mineral (DIM) Bandung*.
- Winudharta, W., 2021. Geologi dan Studi Fasies Gunung Api Purba Gunung Budeg Kecamatan Campurdarat, Kabupaten Tulungagung. *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea* (Abstrak).