

Geologi dan Mineralisasi Endapan Emas Orogenik di Gunung Lipan, Kecamatan Rorowatu, Kabupaten Bombana, Sulawesi Tenggara, Indonesia

Hidayatullah, Arifudin Idrus & Anastasia Dewi Titisari*

Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada – Yogyakarta

**Email: arifidrus@ugm.ac.id*

SARI

Prospek Gunung Lipan terletak di Kecamatan Rorowatu, Kabupaten Bombana, Provinsi Sulawesi Tenggara, secara fisiografi terletak di pegunungan Rumbia, yang disusun oleh batuan metamorf kompleks Pompageo. Prospek Gunung Lipan merupakan lokasi yang berpotensi menghasilkan mineralisasi emas di Pegunungan Rumbia, Namun penelitian rinci belum pernah dilakukan, penelitian terbaru masih bersifat regional. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mendetailkan kondisi geologi, tipe alterasi dan karakteristik mineralisasi pada prospek gunung Lipan dan sekitarnya. Metode penelitian yang dilakukan antara lain Pemetaan geologi, analisis petrografi untuk mengetahui tipe *hostrock*, analisis mikroskopi bijih untuk mengetahui mineral sulfida yang hadir dalam batuan/urat, dan geokimia bijih untuk mengetahui kadar logam dalam batuan dan urat. Mineralisasi emas di gunung Lipan memiliki *hostrock* berupa batuan metamorf sekis mika, dengan struktur geologi pengontrol mineralisasi berupa sesar geser mengiri yang membentuk zona rekahan (*shear zone*). Pergerakan sesar di lapangan diindikasikan dengan adanya struktur milonit pada batuan dan tekstur *mica fish* pada pengamatan mikroskopis. Alterasi hidrotermal yang muncul di lokasi penelitian merupakan jenis alterasi tipikal yang ditemukan pada endapan emas orogenik seperti silisifikasi, karbonatisasi, dan karbonisasi, argilik dan propilitik. Mineral-mineral sulfida penciri endapan emas tipe orogenik yang hadir dalam penelitian ini yakni stibnit, sinnabar, tripuhyit, pirit, arsenopirit, dan hematit. Mineral-mineral sulfida hadir dalam batuan dan urat dalam bentuk *disseminated*. Berdasarkan hasil analisis geokimia kadar emas berkisar <0,005 ppm hingga 1,25 ppm, emas kadar tinggi ditemukan pada urat kuarsa yang memotong foliasi dan urat dengan tekstur *breksiasi*. Korelasi unsur-unsur logam dengan metode statistik multivariat menunjukkan unsur emas berkorelasi positif dengan unsur As, Sb, dan Hg, berkorelasi negatif dengan unsur Ag, serta unsur logam dasar (Pb, Zn, dan Cu) tidak melimpah dan mengalami penipisan saat terjadi peningkatan derajat metamorfisme, hal ini mengindikasikan sebuah karakteristik khas pada endapan emas orogenik.

Kata kunci: Emas orogenik; Gunung Lipan; Bombana; Sulawesi Tenggara; Indonesia

How to Cite: Hidayatullah, Idrus, A., Titisari, A.D., 2022. Geologi dan Mineralisasi Endapan Emas Orogenik di Gunung Lipan, Kecamatan Rorowatu, Kabupaten Bombana, Sulawesi Tenggara, Indonesia. Jurnal Geomine, 10 (3): 235-257.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Article History:

Submit 05 August 2022

Received in from 09 August 2022

Accepted 29 October 2022

Licensed By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ABSTRACT

The prospect of Gunung Lipan is located in Rorowatu District, Bombana Regency, Southeast Sulawesi Province. Physiographically it is situated in the Rumbia mountains, which is occupied by the metamorphic rocks of Pompaseo complex. The Gunung Lipan is a prospect which has potential to produce gold mineralization in the Rumbia Mountains. However, a detailed research has never been carried out, in which the latest research is still on regional scale. Therefore, this study aims to understand more details about the geological conditions, alteration types and mineralization characteristics of the prospect and its surroundings. The research methods include geological mapping, petrographic analysis to determine type of hostrock, ore microscopy analysis to determine sulfide minerals in rocks/veins, and ore geochemistry to determine metal content in rocks and veins. Gold mineralization in the Gunung Lipan is hosted by mica schist, and controlled by sinistral shear fault in form of shear zone. The fault movement in the field is indicated by the presence of a milonite structure in the rock and the texture of mica fish on microscopic observations. The hydrothermal alteration appears at the study area is a typical type of alteration found in orogenic gold deposits such as silicification, carbonatization, and carbonization, argillic and propylitic. The sulfide minerals of orogenic type of gold deposit occurred in this study consist of stibnite, cinnabar, tripuyite, pyrite, arsenopyrite, and hematite. Sulfide minerals are present in rocks and veins in disseminated form. Based on the results of geochemical analysis of gold content ranging from <0.005 ppm to 1.25 ppm, high grade gold was found in quartz veins that cross-cut foliation and veins with brecciated texture. Correlation of metallic elements using multivariate statistical methods shows that gold is positively correlated with As, Sb, and Hg, negatively correlated with Ag, and base metal elements (Pb, Zn, and Cu) are not abundant and are depleted when there is an increase in degree of metamorphism, which obviously implies a typical characteristics of orogenic gold deposit.

Keywords: *Orogenic gold*; Gunung Lipan, Bombana, Southeast Sulawesi, Indonesia

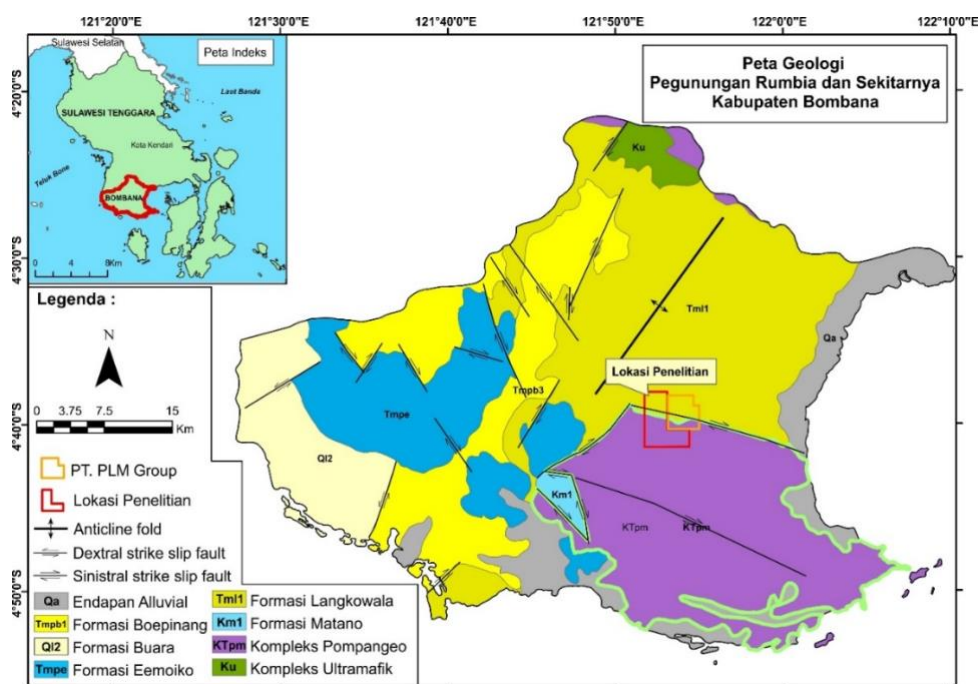
PENDAHULUAN

Aktivitas eksplorasi dan eksploitasi bijih emas (Au) di Indonesia lebih difokuskan pada batuan vulkanik. Hal ini karena aktivitas vulkanik erat kaitannya dengan proses hidrotermal yang dapat menghasilkan mineralisasi bijih. Namun, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknik eksplorasi membuat batuan metamorf saat ini menjadi target dalam kegiatan eksplorasi. Kompleks batuan metamorf di Pulau Sulawesi berpotensi menghasilkan emas tipe orogenik seperti yang telah ditemukan di Awak Mas (Ernowo et al., 2019; Hakim et al., 2018), Rampi (Idrus et al., 2016) dan Pegunungan Rumbia (Hasria et al., 2017; Idrus et al., 2017, 2012, 2011; Mawaleda et al., 2017). Kompleks batuan metamorf Pompaseo yang terdapat di Pegunungan Rumbia, Kabupaten Bombana, Provinsi Sulawesi Tenggara merupakan salah satu kompleks batuan metamorf yang berpotensi menghasilkan emas tipe orogenik dengan kadar emas yang bervariasi, mulai dari di bawah ambang batas (0,005 g/t) hingga 134 g/t (Idrus et al., 2012). Di bagian barat Pegunungan Rumbia, terdapat potensi mineral emas primer tipe orogenik yakni di daerah Gunung Lipan. Pada wilayah ini, belum pernah dilakukan penelitian secara rinci terkait karakteristik geologi dan mineralisasi logam. Penelitian terbaru masih bersifat regional dan lokasi pengambilan sampel masih terbatas pada lembah-lembah bukit. Berkaitan dengan ini, maka perlu dilakukan penelitian rinci

terkait karakteristik geologi, alterasi, dan mineralisasi di wilayah Gunung Lipan dan sekitarnya untuk mendukung data penemuan deposit emas primer baru di Pegunungan Rumbia yang nantinya akan dijadikan acuan dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi emas primer tipe orogenik di Lengan Tenggara Pulau Sulawesi. Lokasi penelitian secara administratif terletak di Prospek Gunung Lipan, Kecamatan Rorowatu, Kabupaten Bombana, Provinsi Sulawesi Tenggara. Secara geografis, lokasi penelitian berada pada koordinat UTM 51S dengan Koordinat X: 373772-373781 dan Y:9487607-9481523. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik geologi yang mengontrol mineralisasi dan karakteristik endapan emas tipe orogenik di lokasi penelitian yang dapat dijadikan acuan untuk eksplorasi lebih rinci.

GEOLOGI REGIONAL

Lokasi penelitian termasuk dalam zona morfologi Pegunungan Rumbia yang memiliki topografi yang kasar dengan kemiringan lereng yang tinggi (Suroño dan Hartono, 2013). Tataan stratigrafi lokasi penelitian disusun oleh batuan metamorf Kompleks Pompango yang berumur Neogen yang terbentuk pada fasies sekishijau hingga sekisbiru (Hasria, 2018; Mawaleda et al., 2017; Suroño dan Hartono, 2013). Struktur geologi yang berkembang di lokasi penelitian berupa sesar geser mengiri yang memiliki arah Barat Laut – Tenggara. Sesar ini mengontrol bentukan morfologi Pegunungan Rumbia ditandai dengan orientasi yang searah dengan struktur regional ini (Suroño dan Hartono, 2013) (Gambar 1).



Gambar 1. Peta geologi regional bagian selatan dari peta geologi regional lembar Kolaka (T.O Simandjuntak et al., 1993) dan lokasi penelitian.

METODE PENELITIAN

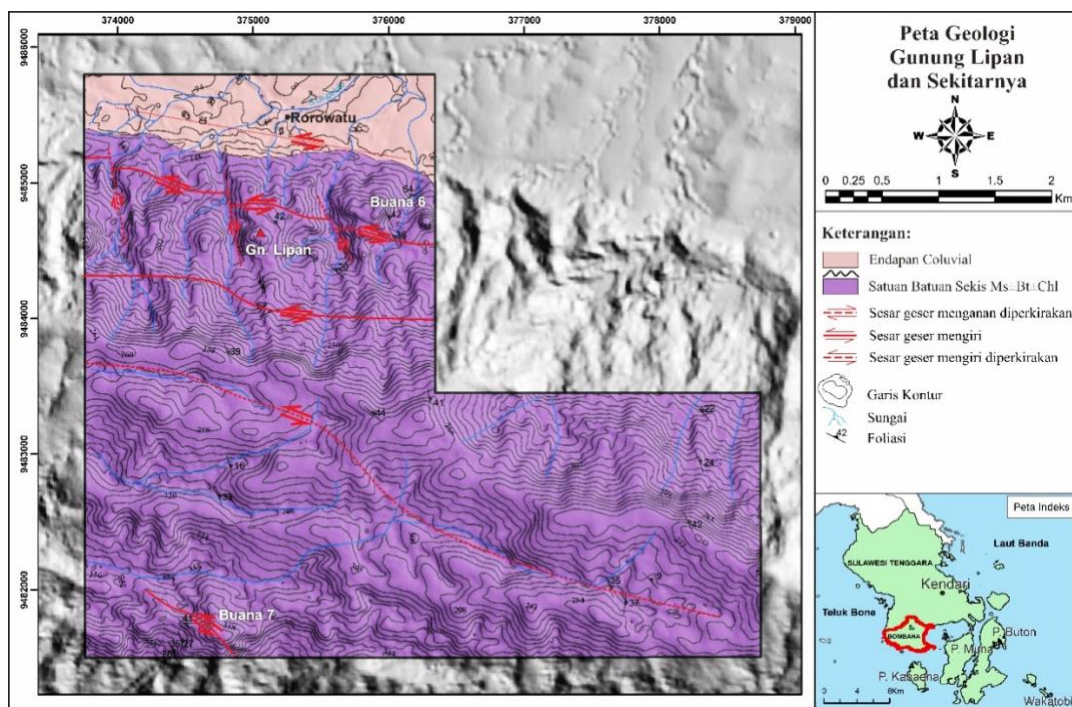
Metodologi penelitian dibagi menjadi dua, yaitu kegiatan lapangan dan laboratorium. Kegiatan lapangan meliputi pemetaan geologi dan alterasi dengan skala 1:25.000, dan pengambilan sampel urat dan batuan. Kegiatan pemetaan menggunakan metode pemetaan sistematis yakni dengan melakukan pengamatan rinci pada singkapan tebing dan aliran sungai. Kegiatan observasi singkapan bertujuan untuk mendapatkan informasi kondisi singkapan, jenis litologi, mineral penyusun batuan baik mineral primer maupun mineral hasil ubahan, tipe dan geometri urat, dan struktur geologi, kegiatan pemetaan sistematis dilakukan pada 85 stasiun titik amat (Gambar 2). Selain observasi singkapan dilakukan juga pengambilan sampel, sampel yang diambil berupa sampel batuan segar untuk mengetahui jenis batuan yang menjadi *hostrock*, sampel urat dengan tekstur yang berbeda, dan batuan hasil alterasi hidrotermal. Kegiatan laboratorium meliputi pengamatan petrografi untuk mengetahui mineral penyusun batuan daerah penelitian, pengamatan mikroskopi bijih dan analisis geokimia kadar logam. Analisis petrografi bertujuan untuk mengamati mineral transparan penyusun batuan, tekstur batuan, dan kumpulan mineral metamorfisme yang akan digunakan untuk penentuan nama batuan dan fasies metamorfisme. Pemilihan sampel untuk analisis petrografi dilakukan dengan melihat tekstur khas pada batuan dalam pengamatan skala makroskopis, kelimpahan mineral penyusun batuan, dan jenis alterasi yang terdapat pada batuan. Sampel terpilih akan di presparasi menjadi sayatan tipis selanjutnya diamati dengan bantuan mikroskop (*Transmitted light microscopy*). Jumlah Sampel yang dianalisis sebanyak 17 sampel yang dianggap mewakili satuan batuan penyusun daerah penelitian dan jenis alterasi. Presparasi sampel dilakukan di Obsidian *laboratory* di Bandung dan pengamatan dilakukan di Laboratorium Geologi Optik Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Analisis mikroskopi bijih bertujuan untuk mengidentifikasi mineral opak yang menyusun batuan yang terbentuk akibat proses mineralisasi. Pemilihan sampel untuk dianalisis mempertimbangkan parameter kehadiran alterasi hidrotermal dan kehadiran mineral bijih pada batuan atau urat, berdasarkan pengamatan makroskopis. Tahapan analisis mikroskopi bijih dimulai dengan membuat sayatan poles batuan kemudian dilakukan pengamatan dengan menggunakan *reflected light mikroskopis*. Jumlah Sampel yang dianalisis sebanyak 15 sampel yang dianggap mewakili jenis tekstur urat dan tipe alterasi. Preparasi sampel dilakukan di Obsidian *laboratory* di Bandung dan pengamatan dilakukan di Laboratorium Get-In CICERO Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Analisis XRD merupakan metode semi-kuantitatif bertujuan untuk mengetahui jenis mineral lempung hasil alterasi hidrotermal. Analisis XRD diawali dengan preparasi sampel dengan cara menghaluskan sampel hingga berukuran lempung, kemudian dilakukan analisis dengan 2 metode yaitu metode *bulk* dan

HASIL PENELITIAN

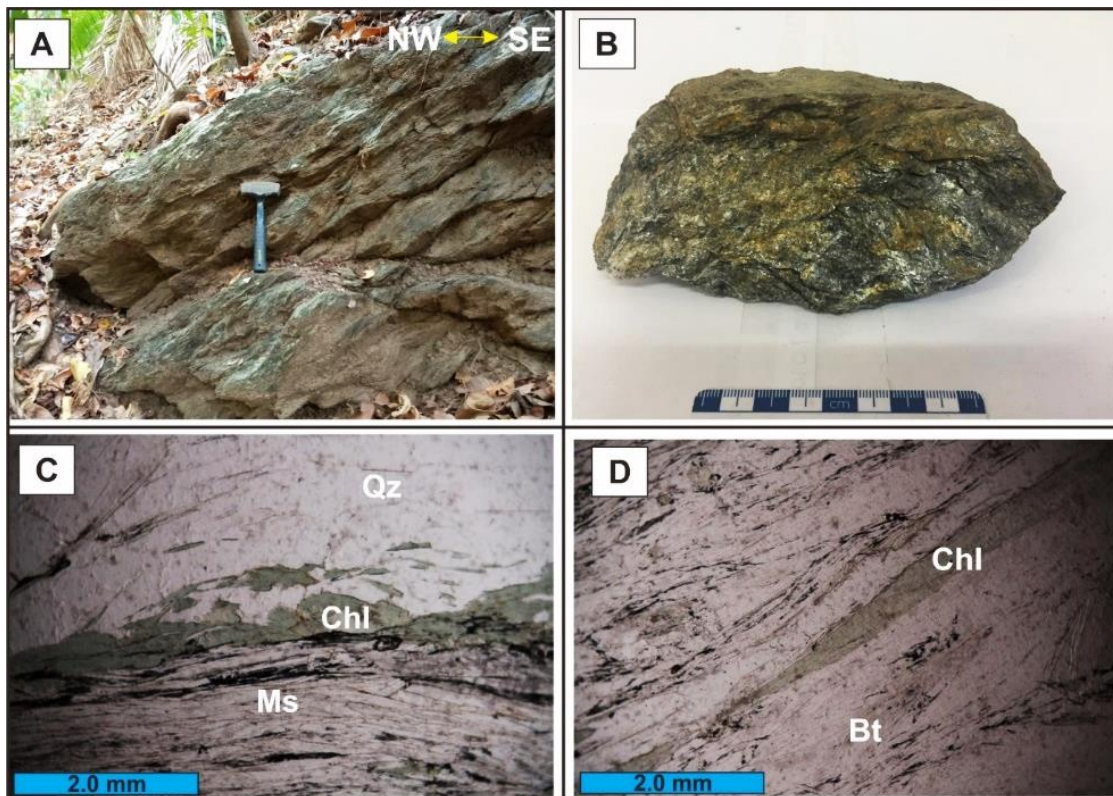
Geologi Daerah Penelitian

Litologi

Secara litologi, daerah penelitian tersusun oleh dua satuan batuan yaitu satuan Sekis $Ms \pm Bt \pm Chl$ (Sekis mika) dan endapan coluvial (Gambar 3). Satuan batuan sekis muskovit $\pm$ biotit $\pm$ klorit tersebar luas pada daerah penelitian, dengan luas sebesar 14.37 km² atau 90% dari total keseluruhan wilayah penelitian. Satuan batuan ini tersebar pada satuan geomorfologi pegunungan struktural berlereng curam dan satuan geomorfologi pegunungan struktural berlereng agak curam hingga curam. Pengamatan skala singkapan (Gambar 4 A) batuan ini telah mengalami pelapukan dengan intensitas rendah, berdasarkan pengamatan contoh setangan batuan memiliki tekstur *phyllitic* dan *schistose* disusun oleh mineral mika (muskovit dan biotit), klorit dan kuarsa.



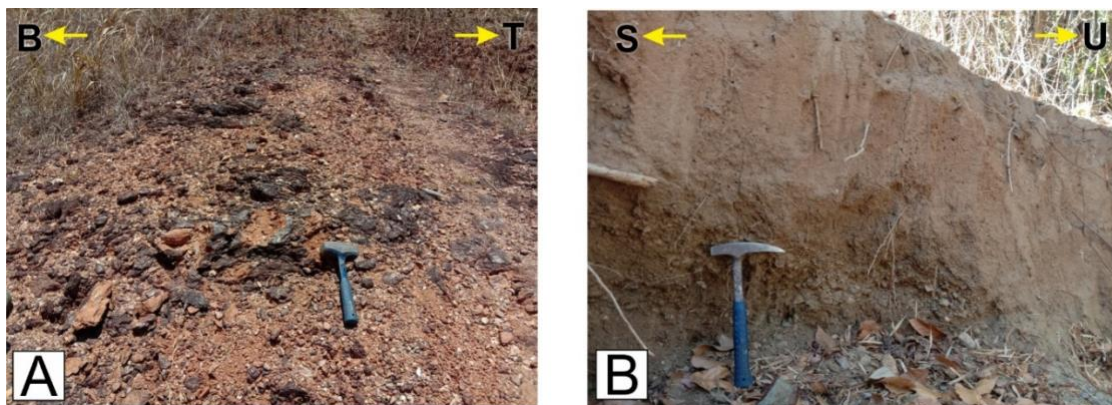
Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian



Gambar 4 (A) Singkapan satuan batuan sekis muskovit ± biotit ± klorit yang telah mengalami pelapukan dengan intensitas rendah (B) Contoh setangan batuan sekis muskovit ± biotit ± klorit dengan tekstur foliasi *schistose* (C dan D) Mikrofoto sayatan batuan pada pengamatan PPL, teramati tekstur batuan foliasi *schistose*, disusun oleh mineral mika, klorit dengan bentuk mineral lepidoblastik. Abreviasi Qz; kuarsa, Chl; klorit, Ms; Muskovit, Bt;biotit

Deskripsi petrografi menunjukkan batuan umumnya memiliki warna *colourless* cerah pada pengamatan PPL dan abu-abu hingga violet pada pengamatan pengamatan XPL, ukuran kristal 1 hingga > 4 mm (halus – kasar), struktur batuan asal foliasi *schistose*, tekstur umum berdasarkan ketahanan mineral kristaloblastik, bentuk mineral subidioblastik, bentuk individu kristal lepidoblastik (Gambar 4 C dan D). mengacu pada klasifikasi IUGS SCMR, 2007 batuan dinamakan sebagai sekis muskovit±biotit±klorit. Hasil analisis XRD teridentifikasi (Gambar 9) klorit pada batuan sekis mika merupakan klorit jenis *clinoclore* di mana klorit jenis ini merupakan klorit metamorfisme yang terbentuk dari batuan asal berupa material sedimen halus (pelitik) yang kaya akan unsur Mg (Merriman dan Peacor, 1998). Satuan batuan sekis mika berdasarkan asosiasi kehadiran mineral dari hasil analisis petrografi dan XRD maka batuan ini digolongkan ke dalam batuan metamorf yang terbentuk pada fasies sekishijau. Satuan batuan ini menjadi *hostrock* mineralisasi di daerah penelitian dikenali dengan hadirnya mineral *pathfinder* (stibnit dan sinnabar) yang berasosiasi dengan urat kuarsa

Satuan endapan koluvial ini tersebar di bagian utara lokasi penelitian dengan luas 1,46 Km² atau 10% dari total luas lokasi penelitian. Satuan ini menempati satuan geomorfologi dataran koluvial. Endapan ini merupakan produk *debri* flow batuan sekis mika di lokasi penelitian yang masih bersifat *loose*, berdasarkan pengamatan di lapangan satuan ini disusun oleh batuan konglomerat, dengan matriks berupa pasir berukuran sedang - kasar dengan mineral penyusun berupa kuarsa, sinnabar, fragmen sekis mika, material berukuran lanau-lempung dan mineral logam yakni emas *placer* (Gambar 5). Di sekitar sungai aktif satuan ini disusun oleh material pasir berukuran halus hasil proses fluviatil (Gambar 5).

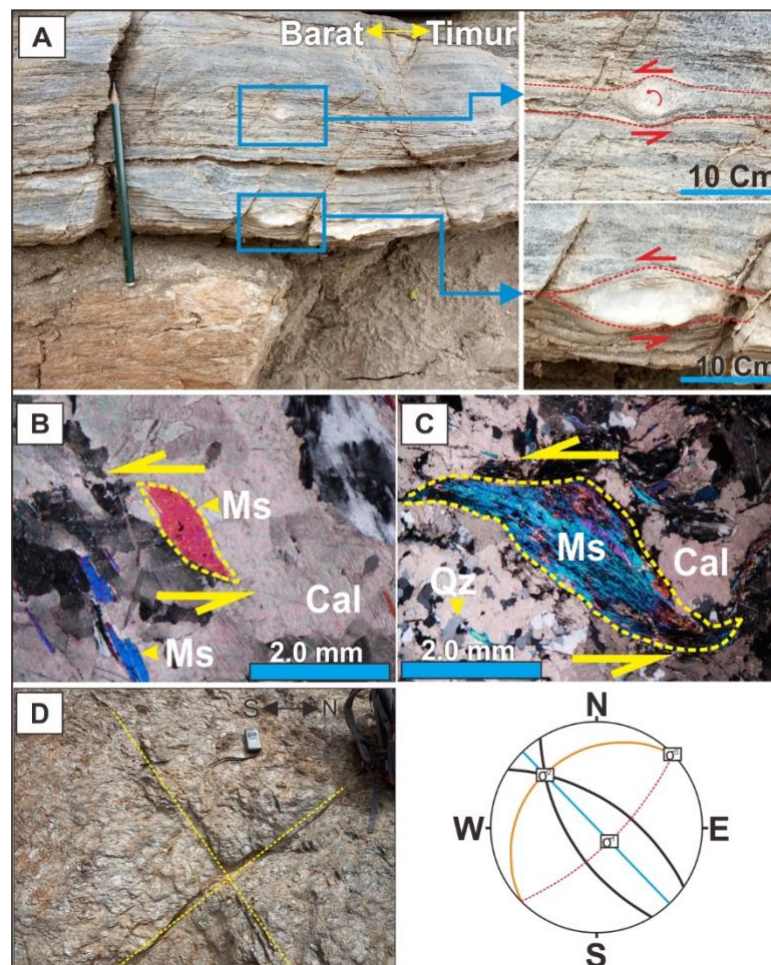


Gambar 5 (A) Batuan konglomerat yang terbentuk dari rombakan batuan sekis mika (B) Produk endapan sungai dari produk fluviatil

Struktur Geologi

Struktur geologi merupakan fitur penting dalam endapan emas orogenik, hal ini dikarenakan struktur berperan sebagai jalur aliran fluida yang kaya akan kandungan logam, struktur geologi dalam endapan emas orogenik memiliki dimensi cm hingga Km dan membentuk zona, kerap kali struktur menjadi *host* mineralisasi dalam endapan emas orogenik (Gaboury, 2019; Gaboury et al., 2001; Groves et al., 2018; Ridley, 2013). Lokasi penelitian merupakan zona sesar geser (*shear zone*), *Shear zone* adalah zona tabular suatu batuan yang mengalami *strain* yang lebih tinggi dari batuan di sekitarnya (Fossen, 2010). Rekahan dan perpindahan pada zona ini kehadirannya sangat terbatas karena lingkungan pembentukannya memiliki suhu dan tekanan tinggi, yang terjadi hanyalah perubahan orientasi batuan baik itu berupa rotasi, dilatasi, distorsi, dan translasi (Fossen, 2010). Identifikasi *shear zone* umumnya dilakukan dengan berbagai skala mulai dari skala singkapan hingga skala mikroskopis, struktur yang teridentifikasi di lapangan secara sederhana dapat digunakan untuk analisis kinematika struktur geologi. Struktur geologi yang ditemukan pada daerah penelitian antara lain sesar geser dikenali dari pengamatan singkapan dengan hadirnya porfiroblas dengan tekstur milonit yang menunjukkan arah pergeseran mengiri (Gambar 6 A), dan pada skala mikroskopi struktur sesar geser

diidentifikasi dari tekstur S-C yakni hadirnya *mica fish* dengan arah pergerakan mengiri (Gambar 6 B dan C). Struktur geologi lain yang ditemukan yakni kekar gerus, dari analisis streoskopis diperoleh arah sigma 1 N 225°E/20, sigma 2 N045°W/71 dan sigma 3 N138°E/89 sedangkan arah *release joint* N225°E/19 dan arah *extension joint* N139°E/90 (Gambar 6 D). Struktur sesar geser merupakan struktur yang dominan ditemukan di lokasi penelitian yang mengontrol mineralisasi.

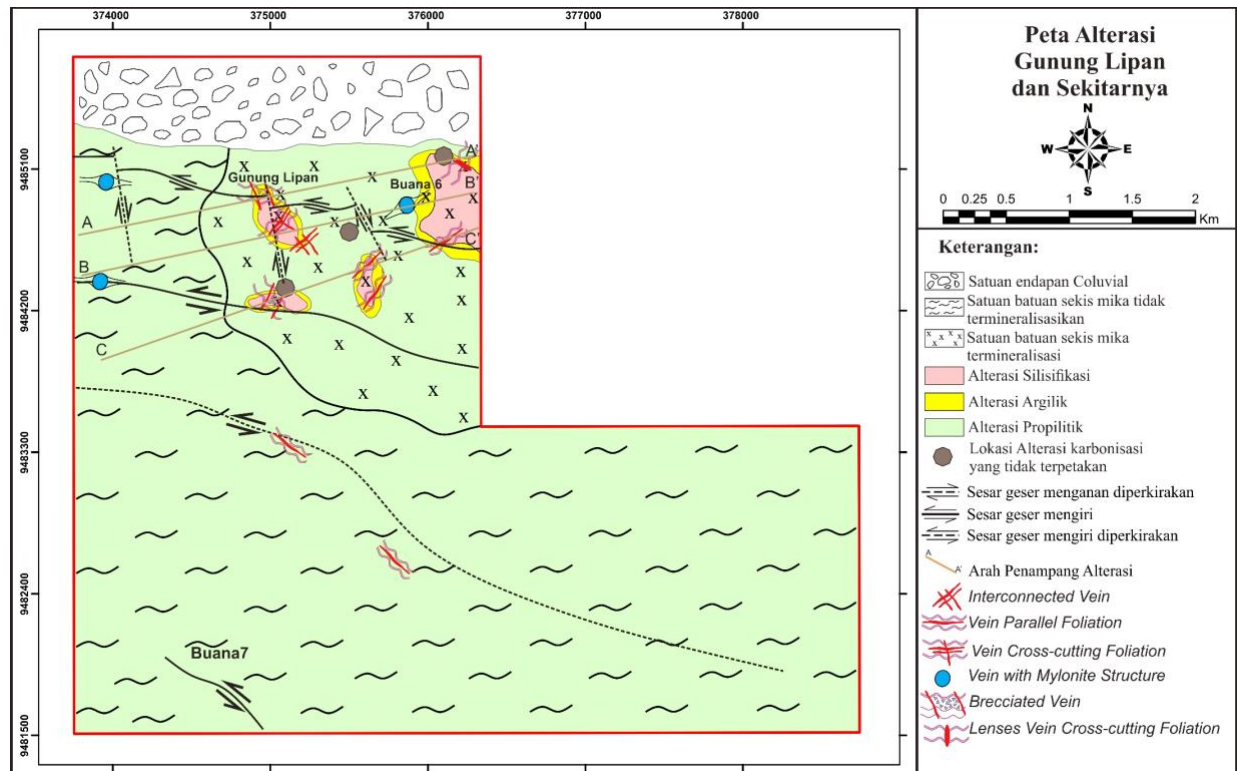


Gambar 6 Indikator zona sesar (A) Struktur milonit yang terdapat pada batuan, menunjukkan arah pergeseran ke kiri (B dan C) mikrofoto tekstur *Mica fish* pada batuan sekis mika, menunjukkan arah pergeseran ke kiri. (D) Struktur kekar gerus dan hasil analisis streografis. Abreviasi= Ms:muskovit, Cal: kalsit, Qz:kuarsa

Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal di lokasi penelitian ditentukan berdasarkan pengamatan di lapangan dan analisis laboratorium yakni pengamatan petrografi dan analisis XRD, hasil integrasi menunjukkan daerah penelitian secara keseluruhan telah mengalami alterasi hidrotermal dengan intensitas yang lemah pada bagian selatan dan intensitas kuat pada bagian utara. Tipe alterasi hidrotermal yang teridentifikasi di lokasi penelitian yaitu alterasi silisifikasi (Kuarsa-kaolin-illit-pirit-hematit), alterasi argilik (kaolin-serisit-wairakit), alterasi

propilitik (Kalsit-illit-smektit) dan alterasi karbonisasi yang tersebar secara setempat-setempat (Gambar 7).



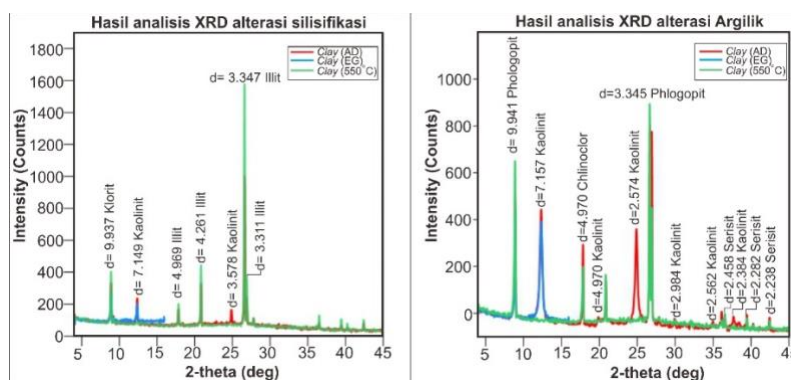
Gambar 7 Peta alterasi daerah penelitian

Alterasi silisifikasi merupakan jenis alterasi yang terbentuk akibat adanya penambahan silika pada batuan menggantikan mineral-mineral yang terbentuk sebelumnya, silisifikasi merupakan alterasi khas yang dijumpai di setiap endapan emas orogenik (Groves et al., 1998). Alterasi silisifikasi di daerah penelitian dijumpai pada daerah yang memiliki permeabilitas tinggi atau dekat dengan zona struktur, secara mineralogi alterasi ini dikenali dengan hadirnya mineral kuarsa pada batuan yang dominan mengisi bidang lemah batuan seperti foliasi ataupun rekahan yang terbentuk akibat tektonik, berdasarkan analisis XRD (Gambar 9) mineral lempung yang hadir dalam alterasi ini yaitu kaolin, klorit dan illit. Pengayaan mineral atau mineralisasi dijumpai pada zona ini dengan mineral bijih berupa stibnite, tripuyhit, pirit (Gambar 8 B dan C), arsenopirit, sinnabar (Gambar 15 C dan D).



Gambar 8 (A) Batuan sekis mika yang mengalami alterasi silisifikasi dengan intensitas kuat (B) Mineral stibnite dan tripuhyite yang hadir mengisi bidang foliasi batuan (C dan D) kenampakkan mikroskopis batuan yang teralterasi silisifikasi, menunjukkan kuarsa hadir secara dominan dalam batuan. Abreviasi ; Qz:kuarsa, Ms:muskovit, Alt:alunit, Py:pirit

Analisis petrografi dan mikroskopi bijih pada batuan teralterasi silisifikasi menunjukkan mineral kuarsa hadir secara dominan dan mineralisasi cukup intensif. Pada pengamatan petrografi, batuan teralterasi silisifikasi tekstur batuan asal sudah tidak teridentifikasi. Batuan disusun oleh kuarsa, muskovit, pirit, dan hematit dengan ukuran <0.01 mm – 3 mm (Gambar 8 C dan D). Berdasarkan analisis mikroskopi bijih mineral logam yang hadir yaitu pirit, Arsenopirit, sinnabar, stibnite dan hematit sebagai mineral pengganti pirit. Mineral sulfida di dalam batuan dan urat tersebar (*disseminated*) berukuran butir halus-sedang, beberapa mineral pirit hadir mengikuti orientasi foliasi batuan.



Gambar 9 hasil analisis XRD batuan teralterasi silisifikasi dan Argilik

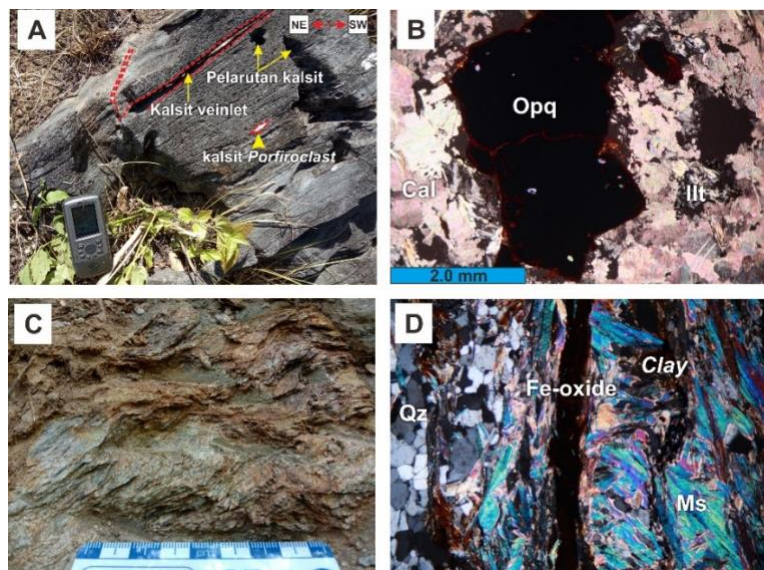
Zona alterasi argilik ditemukan di lokasi penelitian dengan persebaran yang sempit, alterasi ini berkembang dibatas luar alterasi silisifikasi dan hadir dekat dengan zona struktur,

pada skala singkapan alterasi ini dijumpai menyelubungi urat kuarsa dan grafit (**Gambar 10**). Alterasi ini dicirikan oleh melimpahnya mineral lempung (*clay mineral*), dari hasil analisis XRD mineral lempung yang teridentifikasi yaitu kaolinit, serisit, wairakit dan illit (Gambar 9). mineral logam yang hadir pada zona ini yaitu pirit dengan kelimpahan yang sangat sedikit.

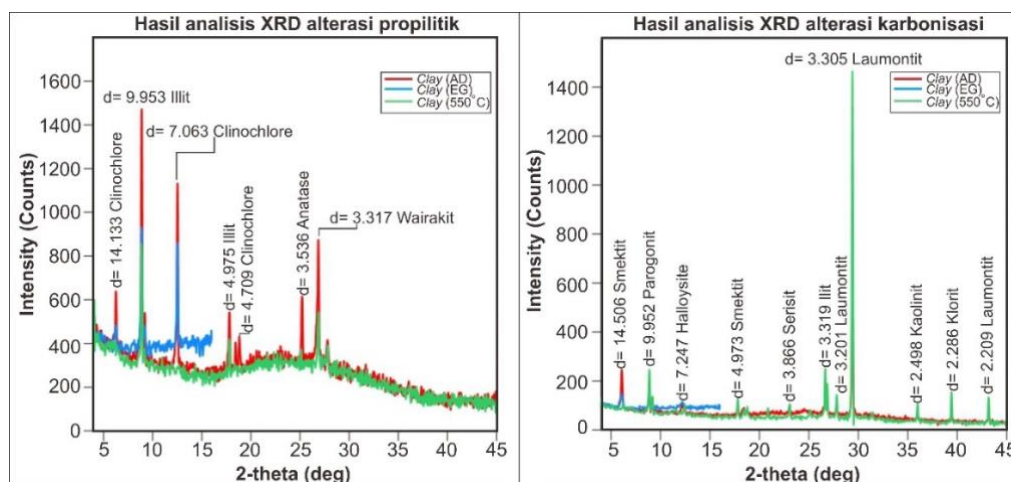


Gambar 10 alterasi argilik yang berkembang di lokasi penelitian, alterasi argilik hadir menyelubungi urat kuarsa dan mineral grafit

Zona alterasi propilitik merupakan alterasi yang persebarannya luas di lokasi penelitian dengan intensitas rendah hingga intensitas tinggi. Alterasi propilitik yang berkembang di lokasi penelitian terdiri dari 2 karakteristik yang khas, alterasi propilitik tipe 1 terbentuk oleh proses karbonatisasi atau penambahan CO_2 pada batuan dicirikan oleh hadirnya mineral karbonat yang melimpah pada batuan dan alterasi propilitik pada batuan sekis mika yang dicirikan oleh hadirnya mineral lempung berupa illit dan anatase. Pengamatan di lapangan (Gambar 11A) menunjukkan alterasi karbonatisasi intensitas alterasinya kuat dan menggantikan mineral dalam batuan secara pervasive. Zona alterasi karbonatisasi mengalami mineralisasi ditandai dengan hadirnya mineral kalkopirit, pirit dan hematit (Gambar 15 A dan B). Alterasi karbonatisasi dihasilkan oleh fluida yang kaya akan CO_2 yang terbentuk pada tekanan yang tinggi dengan pH netral-alkalin, alterasi karbonatisasi merupakan jenis alterasi yang sering hadir pada endapan emas tipe orogenik (Groves et al., 1998; Robb, 2005). Alterasi propilitik yang kedua berdasarkan analisis XRD (Gambar 12) dicirikan oleh mineral lempung illit, anatase. Alterasi ini terbentuk pada daerah dengan permeabilitas rendah, memiliki intensitas alterasi lemah hingga sedang. Berdasarkan hasil analisis petrografi batuan yang teralterasi propilitik tipe 2 disusun oleh mineral muskovit, kuarsa, mineral opak, kalsit dan mineral lempung (Gambar 11 C dan D). Berdasarkan analisis mikroskopi bijih zona alterasi propilitik pada batuan sekis mika tidak mengalami pengayaan mineral logam hanya mineral pirit yang teridentifikasi dengan kehadiran sangat sedikit, berukuran butir halus 0,1mm-1mm.



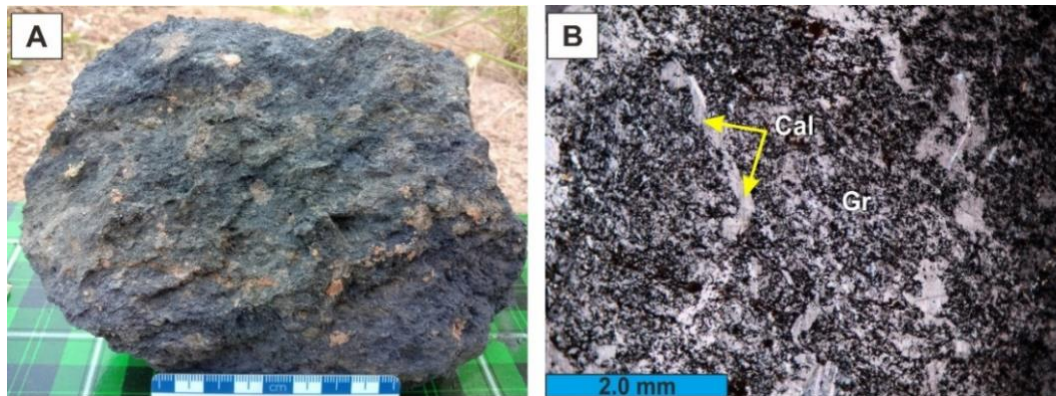
Gambar 11 (A) singkapan batuan sekis mika teralterasi karbonatisasi (B) mikrofoto batuan sekis mika teralterasi karbonatisasi (C) singkapan batuan sekis mika teralterasi propilitik tipe 2 (D) mikrofoto batuan sekis mika teralterasi propilitik tipe 2. Abreviasi: Ms: muskovit, Cal: kalsit, Qz: kuarsa, Ilt: illit, Opq: mineral opak



Gambar 12 Hasil analisis XRD batuan teralterasi propilitik tipe 2 dan karbonisasi

Alterasi karbonisasi merupakan alterasi yang terbentuk karena adanya penambahan unsur C pada batuan. Alterasi ini penyebarannya hanya setempat-setempat dengan luasan yang sangat kecil sehingga tidak dapat terpetakan. Berdasarkan pengamatan di lapangan alterasi ini hadir memotong bidang foliasi batuan dan tersebar secara acak di dalam batuan pada contoh setangan. dijumpai pada daerah dengan permeabilitas tinggi dan batas luar dari alterasi ini adalah alterasi argilik. Berdasarkan analisis petrografi (Gambar 13 B) batuan yang teralterasi karbonisasi batuan disusun oleh mineral muskovit, grafit, kalsit dan mineral opak, berdasarkan analisis XRD (Gambar 12) mineral lempung yang hadir pada zona alterasi karbonisasi adalah kaolinit, halloysite, serisit, laumontite, illit dan klorit. Alterasi karbonisasi merupakan alterasi khas di endapan emas orogenik yang terbentuk akibat proses grafitisasi

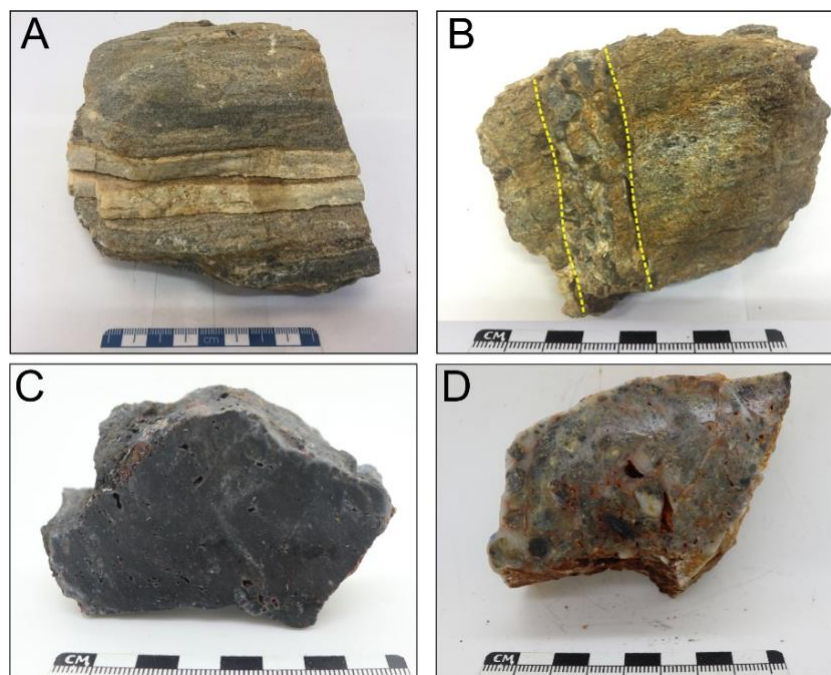
di mana material organik yang terkandung dalam batuan sedimen halus pada saat terjadi peningkatan derajat metamorfisme (fasies zeolit ke fasies sekishijau) akan mengalami pematangan dan pelepasan unsur C selanjutnya unsur C tersebut diendapkan pada bukaan yang terbentuk akibat gaya tektonik (Gaboury et al., 2021; Large et al., 2011).



Gambar 13 (A) Contoh setangan mineral grafit (B) mikrofoto batuan sekis mika teralterasi karbonisasi. Abreviasi; Cal:kalsit, Gr:Grafit

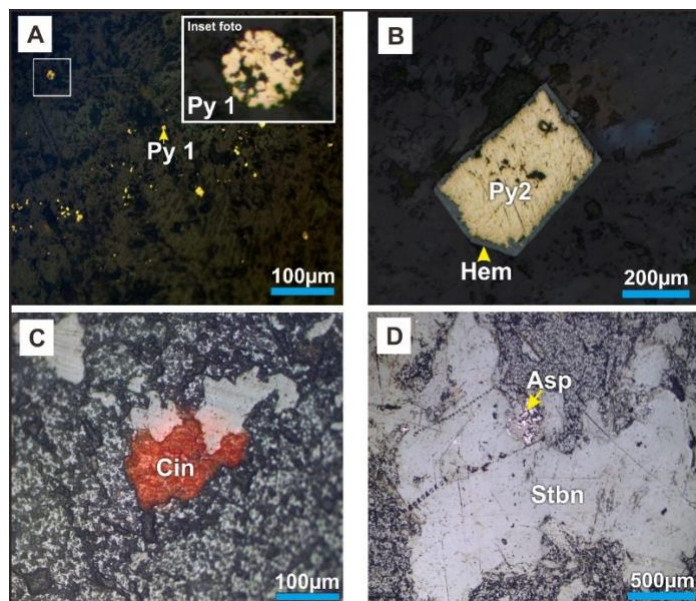
Mineralisasi Bijih

Mineralisasi pada daerah penelitian terjadi sangat intens pada alterasi silisifikasi sedangkan pada alterasi lain mineralisasi sangat rendah. Mineralisasi pada alterasi silisifikasi ditemukan pada urat kuarsa dengan berbagai macam tekstur seperti urat sejajar foliasi, urat memotong foliasi, urat terbreksiasi, dan urat masif (Gambar 14).



Gambar 14. (A) tekstur urat kuarsa dengan orientasi sejajar foliasi (B) urat kuarsa memotong folias (C) urat kuarsa massif dengan tekstur *vuggy* (D) urat kuarsa dengan tekstur breksiasi

Observasi lapangan dan pengamatan mikroskopi bijih menunjukkan mineral bijih yang hadir pada daerah penelitian antara lain sinnabar (HgS), stibnit (Sb_2S_3), pirit framboidal (*pyrite* tipe 1), pirit euhedral (*pyrite* tipe 2), arsenopirit (FeAsS), dan Hematit (Fe_2O_3). Mineral *gangue* yang hadir berupa mineral kuarsa (SiO_2) dan kalsit (CaCO_3). Pirit merupakan mineral sulfida yang dominan, dan dikelompokkan menjadi dua tipe. Pirit tipe 1 (Gambar 15 A) yang merupakan pirit dengan tekstur framboidal, berukuran sangat halus < 1 mm, dengan persebaran *disseminated* di sepanjang bidang foliasi batuan. Pirit tipe 1 ditemukan pada batuan metamudstone dengan jenis alterasi karbonatisasi dengan tingkat alterasi sangat intens. Pirit tipe 2 merupakan pirit dengan bentuk subhedral hingga euhedral berukuran $0.5 - 1$ mm, tersebar di semua jenis litologi dan jenis alterasi baik dengan intensitas alterasi lemah hingga kuat. Pada tahap lanjut, pirit tipe 2 tergantikan oleh mineral Hematit (Gambar 15 B). Arsenopirit memiliki warna putih cerah, ukuran halus, tidak mudah dikenali di lapangan, tetapi pada pengamatan mikroskopis hadir pada batuan maupun urat dengan ukuran halus (Gambar 15 D). Sinnabar merupakan mineral pembawa unsur Hg pada pengamatan mikroskopis memiliki warna merah, dengan ukuran $0,1 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$, berbentuk subhedral dan tersebar secara acak di dalam batuan (Gambar 15 C). Stibnit di lapangan ditemukan dalam urat kuarsa dan mengisi rekahan batuan, stibnit memiliki karakteristik tekstur menjarum, kilap logam, dan ketika mengalami pelapukan terubahkan menjadi tripuhyt (Gambar 8.B), stibnit merupakan mineral pembawa unsur Sb memiliki karakteristik warna abu-abu cerah, tekstur menjarum dan kehadirannya melimpah pada batuan sekis mika yang teralterasi silisifikasi dengan intensitas yang kuat (Gambar 15 D). hematit hadir di dalam batuan maupun urat dengan ukuran $0.2 \text{ mm} - 1.5 \text{ mm}$, memiliki warna abu-abu cerah keunguan, berbentuk subhedral – euhedral, mudah dikenali karena memiliki *internal reflection* merah cerah pada pengamatan *cross polarized light*. Hematit hadir sebagai mineral pengganti pirit tipe 2 (Gambar 15 B) merupakan mineral yang dihasilkan dilingkungan pelapukan.



Gambar 15 (A) pirit framboidal (Py1) pada batuan metamudstone dengan pertumbuhan sejajar bidang foliasi batuan (B) pirit euhedral (Py2) pada urat kuarsa yang mengalami pergantian oleh mineral hematit (C) mineral sinnabar pada batuan sekis mika (D) mineral stibnit hadir bersama mineral arsenopirit. Abreviasi: Py1: pirit framboidal, Py2: pirit euhedral, Cin: sinnabar, Asp: arsenopirit, Stbn: stibnite

Geokimia Batuan

Geokimia mineral logam berupa emas (Au), antimony (Sb), merkuri (Hg), tembaga (Cu), timbal (Pb), seng (Zn), perak (Ag), Arsen (As) kadarnya diketahui berdasarkan analisis FA-AAS (Tabel 1). Hasil analisis menunjukkan kadar emas dalam batuan dan urat sangat bervariasi mulai dari di bawah ambang batas $<0,005$ ppm hingga 1,25 ppm. Kadar emas tertinggi terdapat pada batuan sekis mika dengan urat kuarsa memotong foliasi dan urat kuarsa dengan tekstur breksiasi.

Korelasi antar unsur logam dalam batuan diketahui dengan cara melakukan analisis koefisien korelasi Spearman, di mana metode korelasi ini sangat cocok untuk sekumpulan data yang memiliki distribusi yang tidak normal (Rollinson, 2014). Korelasi Spearman dilakukan dengan membuat tabel matriks korelasi (Tabel 2) kemudian hasil dari korelasi matriks ditampilkan ke dalam grafik untuk melihat tingkat korelasi antar unsur logam dalam batuan.

Hasil analisis korelasi Spearman (Gambar 17) menunjukkan batuan sekis mika yang teralterasi silisifikasi menunjukkan Au berkorelasi positif dan kuat dengan unsur Sb, As, dan Hg, dengan koefisien korelasi secara berturut-turut 0.9, 1 dan 0.3, meskipun koefisien korelasi Hg rendah namun berkorelasi positif dan Hg merupakan *pathfinder element* dalam mineralisasi emas orogenik. Unsur Ag berkorelasi negatif dengan unsur Au dan memiliki nilai koefisien korelasi sebesar -0.6, rendahnya kadar Ag pada batuan merupakan salah satu karakteristik mineralisasi pada endapan emas orogenik (Groves, 1993; Groves et al., 2020a).

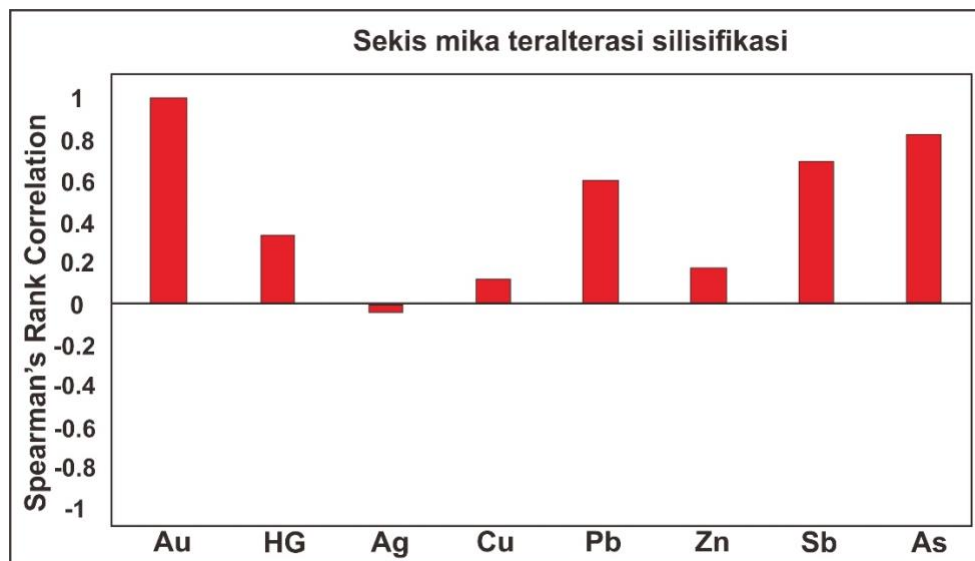
Tabel 1. Hasil analisis kadar logam dengan metode FA/AAS

Kode sampel	Unsur logam (ppm)								Tipe alterasi
	Au	Hg	Ag	Cu	Pb	Zn	Sb	As	
AABI-2.A	0,07	2,92	0,07	7,00	8,00	8,00	28,00	284	Silisifikasi
AABI-2.B	0,14	0,29	0,07	4,00	17,00	8,00	72,00	438	Silisifikasi
AABI-8	0,03	0,64	0,07	36	23,00	51,00	7,00	149	<i>Least sltered</i>
AABI-27	0,30	0,05	0,07	30	41,00	71,00	26,00	781	Silisifikasi
AABI-29	0,00	0,01	0,07	1,00	2	2,00	0,71	3	<i>Least sltered</i>
AABI-34.A	0,08	0,03	0,07	3,00	161	28,00	180	54	Silisifikasi
AABI-34.B	0,01	1,28	0,10	4,00	3,00	15,00	4,00	9,00	Silisifikasi
AABI-46	0,01	0,02	0,07	22	25,00	86,00	1,00	3,00	<i>Least sltered</i>
AABI-57	0,01	0,02	0,07	18	22,00	43,00	2,00	7,00	Silisifikasi
AABI-76	0,02	0,01	0,07	9	18,00	76,00	1,00	1,41	Silisifikasi
AABI-3.A	1,25	0,34	0,07	35	37	77	47	300	Silisifikasi
AABI-37	0,02	0,05	0,07	12	2	5	17	104	Silisifikasi
AABI-38.A	0,03	0,37	0,07	6	3	3	10	73	Silisifikasi
AABI-38.B	0,86	0,72	0,1	15	8	3	21	525	Silisifikasi
AABI-3.B	0,08	0,92	0,1	15	1,41	24	8	40	Silisifikasi
AABI-3.C	0,14	0,48	0,1	10	12	22	31	164	Karbonatisasi
AABI-3.D	0,01	0,21	0,1	23	7	7	13	57	Karbonatisasi
AABI-3.E	0,08	0,31	0,1	20	8	23	43	170	Karbonatisasi
AABI-7	0,01	1,39	0,1	0,70	5	3	22	7	Karbonatisasi
AABI-12	0,01	0,15	0,1	7	1,41	12	2	4	Karbonatisasi
AABI-35	0,01	1,28	0,1	4	3	15	4	9	Karbonatisasi
AABI-50	0,01	0,02	0,2	0,71	5	9	1	3	Karbonatisasi
AABI-4	0,01	0,14	0,1	13	4	24	1	8	Karbonasi

Tabel 2. Matriks korelasi kadar logam batuan sekis mika teralterasi silisifikasi

	Au	Hg	Ag	Cu	Pb	Zn	Sb	As
Au	1,0							
Hg	0,3	1,0						
Ag	-0,6	0,2	1,0					
Cu	0,8	0,1	-0,6	1,0				
Pb	0,8	0,0	-0,6	0,4	1,0			
Zn	0,5	0,0	-0,8	0,6	0,4	1,0		
Sb	0,9	0,6	-0,3	0,4	0,7	0,3	1,0	
As	1,0	0,4	-0,6	0,8	0,7	0,6	0,9	1,00

Logam dasar (Cu, Pb, dan Zn) pada alterasi silisifikasi kadarnya cenderung rendah dan koefisien korelasinya juga rendah. Kadar unsur Hg, Sb, As cenderung mengalami peningkatan pada batuan sekis mika dibandingkan dengan batuan metamudstone yang teralterasi karbonatisasi, hal ini menunjukkan terjadinya transpor logam pada saat terjadi peningkatan derajat metamorfisme di mana logam dasar termobilisasikan dan logam Au, Sb, Hg dan As terkayakan pada batuan sekis mika, hal ini merupakan karakteristik khas untuk mineralisasi emas orogenik (Large et al., 2011; Large and Maslennikov, 2020; Pirajno, 2010; Pitcairn et al., 2010, 2006).



Gambar 17. Grafik korelasi spearman dari unsur logam pada masing-masing alterasi yang ditemukan di lokasi penelitian

DISKUSI

Daerah penelitian tersusun oleh litologi endapan kolumial dan batuan metamorf derajat menengah yakni batuan sekis mika yang terbentuk pada fasies sekishijau, batuan ini terbentuk pada zona *shear zone* dikenali dengan munculnya struktur milonit pada skala makroskopis dan mikroskopis pada masing-masing batuan. Alterasi hidrotermal telah terjadi di seluru batuan sekis mika pada daerah penelitian dengan intensitas yang bervariasi, alterasi hidrotermal yang ditemui yaitu alterasi silisifikasi, alterasi argilik, dan alterasi propilitik dan karbonisasi, alterasi silisifikasi dan argilik terbentuk pada daerah yang memiliki permeabilitas tinggi atau dekat dengan zona struktur dengan luasan mulai dari cm hingga m. sekis mika yang terbentuk pada fasies sekis hijau merupakan batuan induk mineralisasi di daerah penelitian yang mengandung urat/uratan kuarsa dengan struktur sejajar foliasi, memotong foliasi, terbreksikan, dan terdeformasi. Mineralisasi primer yang ditemukan di lokasi penelitian antara lain sinnabar, stibnite, tripuhyit, pirit, kalkopirit, sedikit arsenopirit dan mineral sekunder yang terbentuk akibat terjadi proses pengayaan supergen yaitu hematit yang hadir menggantikan mineral pirit. Pada batuan sekis mika dengan tekstur filitik ditemukan pirit dengan tekstur framboidal, di mana pirit ini merupakan sumber asal unsur emas pada endapan orogenik, pirit framboidal akan terkristalisasi saat terjadi peningkatan derajat metamorfisme membentuk pirit euhedral pada batuan sekis mika dengan tekstur sekistosik. Saat proses mineralisasi dan peningkatan derajat metamorfisme, pirit framboidal tidak hanya mengalami perubahan bentuk namun juga terjadi pelepasan unsur logam Au yang terdapat dalam kristal pirit (Large et al., 2011; Large and Maslennikov, 2020; Pirajno, 2010; Pitcairn et al., 2010, 2006). Analisis koefisien korelasi antar unsur logam pada batuan sekis

mika yang teralterasi silisifikasi menunjukkan unsur Au-Sb-As memiliki korelasi positif dan kuat, unsur Au-Hg memiliki korelasi yang positif dan lemah ditunjukkan dengan nilai koefisien korelasi (r) tidak ≥ 0.5 , dan unsur Au-Ag memiliki korelasi yang negatif. Analisis koefisien korelasi juga menunjukkan terjadi peningkatan korelasi antar unsur Au-Sb-As, dan penurunan koefisien korelasi unsur logam dasar (Cu, Pb, Zn) perilaku unsur ini menunjukkan karakteristik khas endapan emas tipe orogenik. Berdasarkan hasil integrasi data di atas maka, tipe endapan emas di lokasi penelitian dikategorikan sebagai endapan emas orogenik yang terbentuk pada zona transisi Mezozonal-Epizonal (Gaboury, 2019; Goldfarb and Groves, 2015; Groves, 1993; Groves et al., 2020a, 2020b, 1998; Kerrich, 1993; Phillips and Powell, 2010; Pirajno, 2010; Zhong et al., 2015)

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Daerah penelitian disusun oleh dua satuan batuan yaitu endapan koluvial dan batuan metamorf berderajat menengah yakni batuan sekis mika. Struktur geologi di lokasi penelitian merupakan struktur yang terbentuk pada zona *shear zone* indikasinya dikenali dari kehadiran mikrostruktur berupa milonit dan *mica fish*.
2. Alterasi hidrotermal yang ditemukan di lokasi penelitian yaitu silisifikasi, karbonatisasi, karbonisasi, argilik, dan propilitik. Alterasi silisifikasi merupakan alterasi yang menghasilkan mineralisasi emas dan perkembangannya berada pada daerah dengan permeabilitas yang tinggi atau dekat dengan struktur geologi.
3. Jenis alterasi yang menghasilkan mineralisasi sebagian besar berkembang pada bagian utara lokasi penelitian pada batuan sekis mika.
4. Tingkat mineralisasi yang cukup tinggi dijumpai pada bagian utara daerah penelitian ditunjukkan oleh kehadiran stibnit, sinnabar, arsenopirit, pirit, dan hematit. Mineralisasi dijumpai pada urat kuarsa dan batuan dengan kemunculan *disseminated*.
5. Kadar unsur logam Au berkisar 0.005 ppm hingga 1.28 ppm, kadar Au tinggi ditemukan pada batuan dengan urat kuarsa memotong foliasi dan urat kuarsa dengan tekstur breksiasi. Unsur Au berkorelasi positif dan kuat dengan Unsur As, Sb, dan Hg dan berkorelasi negatif dengan unsur Ag
6. Berdasarkan karakteristik endapan di lapangan dan hasil analisis di laboratorium, endapan bijih di daerah penelitian dikategorikan endapan emas orogenik yang terbentuk pada daerah transisi Mesozoneal-Epizonal.

Saran

1. Analisis inklusi fluida pada urat kuarsa penting dilakukan untuk mengetahui genesis pembentukan urat kuarsa.
2. Analisis kimia mineral perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik geokimia yang dapat menjelaskan evolusi transport logam dari batuan yang terbentuk pada fasies zeolite ke batuan yang terbentuk pada fasies sekishijau
3. Survei geofisika dengan metode IP (*Induced Polarization*) dan atau *ground geomagnetic* pada daerah target penting dilakukan untuk mengetahui persebaran urat dilokasi penelitian terutama pada urat kuarsa pada STA 38 karena memiliki ketebalan hingga 2 meter dan memiliki kadar yang cukup tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada para geologist yang telah membantu dalam melakukan penelitian ini, antara lain Arik Bagus kurniady, S.T., M.Eng, Muhammad Arba Azzaman, S.T., M.Eng, dan Muhammad Iksan, S.T. Kepada manajemen PT. Panca Logam Makmur, kami juga sampaikan terimakasih atas penerimaan dan dukungan fasilitas selama kegiatan penelitian berlangsung. Terimakasih juga kepada kepala laboratorium Getln-Cicero yang telah memberikan izin untuk pengamatan mikroskopis bijih. Kepada reviewer, terimakasih atas kritikan dan masukan konstruktifnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ernowo, E., Meyer, F.M., Idrus, A., 2019. Hydrothermal alteration and gold mineralization of the Awak Mas metasedimentary rock-hosted gold deposit, Sulawesi, Indonesia. *Ore Geology Reviews* 113, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103083>
- Fossen, H., 2010. *Structural geology*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Gaboury, D., 2019. Parameters for the formation of orogenic gold deposits. *Applied Earth Science* 128, 124–133. <https://doi.org/10.1080/25726838.2019.1583310>
- Gaboury, D., Carrier, A., Crevier, M., Pelletier, C., Sketchley, D.A., 2001. Predictive distribution of fault-fill and extensional veins; example from the Sigma gold mine, Abitibi Subprovince, Canada. *Economic Geology* 96, 1397–1405.
- Gaboury, D., MacKenzie, D., Craw, D., 2021. Fluid volatile composition associated with orogenic gold mineralization, Otago Schist, New Zealand: Implications of H₂ and C₂H₆ for fluid evolution and gold source. *Ore Geology Reviews* 133, 104086. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104086>
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos* 233, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>

- Groves, D.I., 1993. The crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineral. Deposita* 28, 366–374. <https://doi.org/10.1007/BF02431596>
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews* 13, 7–27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- Groves, D.I., Santosh, M., Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Zhang, L., 2020a. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Miner Deposita* 55, 275–292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L., 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geoscience Frontiers* 9, 1163–1177. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.01.006>
- Groves, D.I., Santosh, M., Zhang, L., 2020b. A scale-integrated exploration model for orogenic gold deposits based on a mineral system approach. *Geoscience Frontiers* 11, 719–738. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.007>
- Hakim, A.Y.A., Melcher, F., Prochaska, W., Bakker, R., Rantitsch, G., 2018. Formation of epizonal gold mineralization within the Latimojong Metamorphic Complex, Sulawesi, Indonesia: Evidence from mineralogy, fluid inclusions and Raman spectroscopy. *Ore Geology Reviews* 97, 88–108. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.05.001>
- Hasria, 2018. Karakteristik Mineralisasi Emas Hidrotermal yang Berasosiasi Dengan Batuan Metamorf di Pegunungan Mendoke dan Rumbia pada Lengan Tenggara Pulau Sulawesi, Indonesia (Disertasi). Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Hasria, H., Idrus, A., Warmada, I.W., 2017. The Metamorphic Rocks-Hosted Gold Mineralization At Rumbia Mountains Prospect Area In The Southeastern Arm of Sulawesi Island, Indonesia. *J. Geoscience Eng. Environ. Technol.* 2, 217. <https://doi.org/10.24273/jgeet.2017.2.3.434>
- Idrus, A., Mansur, S., Ahmad, A., Rahmayuddin, R., Abdul, A., 2016. Occurrences and Characteristics of Gold Mineralization in Rampi Block Prospect, North Luwu Regency, South Sulawesi Province, Indonesia. *J. Appl. Geol.* 1, 63. <https://doi.org/10.22146/jag.26962>
- Idrus, A., Nur, I., Warmada, I.W., Fadlin, F., 2011. Metamorphic Rock-Hosted Orogenic Gold Deposit Type as a Source of Langkowala Placer Gold, Bombana, Southeast Sulawesi. *Indonesian J. Geosci.* 6, 43–49. <https://doi.org/10.17014/ijog.v6i1.114>
- Idrus, A., Prihatmoko, S., Harjanto, E., Meyer, F.M., Nur, I., Widodo, W., Agung, L.N., 2017. Metamorphic rock-hosted orogenic gold deposit style at Bombana (Southeast Sulawesi) and Buru Island (Maluku): Their key features and significances for gold exploration in

- Eastern Indonesia. *J. Geoscience Eng. Environ. Technol.* 2, 124.
<https://doi.org/10.24273/jgeet.2017.2.2.291>
- Idrus, A., Prihatmoko, S., Warmada, I.W., Nur, I., Meyer, F.M., 2012. The Metamorphic Rock-Hosted Gold Mineralization At Bombana, Southeast Sulawesi: A New Exploration Target In Indonesia. *JSDG* 22, 14.
- Kerrick, R., 1993. Perspectives on genetic models for lode gold deposits. *Mineral. Deposita* 28, 362–365. <https://doi.org/10.1007/BF02431595>
- Large, R.R., Bull, S.W., Maslennikov, V.V., 2011. A Carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits. *Economic Geology* 106, 331–358. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.3.331>
- Large, R.R., Maslennikov, V.V., 2020. Invisible Gold Paragenesis and Geochemistry in Pyrite from Orogenic and Sediment-Hosted Gold Deposits. *Minerals* 10, 339. <https://doi.org/10.3390/min10040339>
- Mawaleda, M., Suparka, E., Idham Abdullah, C., Indro Basuki, N., Forster, M., Jamal, Kaharuddin, 2017. Hydrothermal alteration and timing of gold mineralisation in the Rumbia Complex, Southeast Arm of Sulawesi, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 71, 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/71/1/012030>
- Phillips, G.N., Powell, R., 2010. Formation Of Gold Deposits: A Metamorphic Devolatilization Model: Formation Of Gold Deposits. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 689–718. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00887.x>
- Pirajno, F., 2010. Hydrothermal processes and mineral systems, Reprinted with corr. ed. Springer, Dordrecht.
- Pitcairn, I.K., Olivo, G.R., Teagle, D.A.H., Craw, D., 2010. Sulfide Evolution During Prograde Metamorphism Of The Otago And Alpine Schists, New Zealand. *The Canadian Mineralogist* 48, 1267–1295. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.5.1267>
- Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Craw, D., Olivo, G.R., Kerrich, R., Brewer, T.S., 2006. Sources of Metals and Fluids in Orogenic Gold Deposits: Insights from the Otago and Alpine Schists, New Zealand. *Economic Geology* 101, 1525–1546. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1525>
- Ridley, J., 2013. Ore deposit geology. Cambridge University Press, Cambridge : New York.
- Robb, L.J., 2005. Introduction to ore-forming processes. Blackwell Pub, Malden, MA.
- Rollinson, H.R., 2014. Using Geochemical Data, 0 ed. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315845548>
- Stöföller, D. and Grieve, R. A. F. (2007) Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 82-92, 111-125, and 126-242

- Surono, Hartono, U. (Eds.), 2013. Geologi Sulawesi, Cetakan pertama. ed. LIPI Press, Menteng, Jakarta.
- T.O Simandjuntak, Surono, Sukido, 1993. Peta Geologi Regional Lembar Kolaka.
- Zhong, R., Brugger, J., Tomkins, A.G., Chen, Y., Li, W., 2015. Fate of gold and base metals during metamorphic devolatilization of a pelite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 171, 338–352. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.09.013>