STRUCTURAL CONTROL ON MINERALIZATION HIGH SULPHIDATION DEPOSITS IN MOTOMBOTO AREA

Abdul Thayib Banto[1], Muhammad Kasim[1], Intan Noviantari Manyoe[1*], Setiono[2]
[1]Teknik Geologi, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo
[2]PT. Gorontalo Minerals; Talango, Jln. Sawah Besar, 96583
e-mail: *[1]intan.manyoe@ung.ac.id

ABSTRAK

Suatu kontrol utama pembentukan alterasi dan mineralisasi adalah struktur geologi, karena dapat menjadi jalur fluida hidrotermal yang membawa mineral ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan kondisi geologi dan menganalisis kontrol struktur geologi terhadap mineralisasi. Metode yang digunakan adalah observasi lapangan. Observasi lapangan terdiri dari pengamatan geomorfologi, struktur geologi dan litologi. Geomorfologi terdiri pengamatan bentang alam dan stadia sungai. Struktur geologi berupa kekar dan sesar. Litologi meliputi alterasi dan mineralisasi. Hasil observasi lapangan dianalisis geomorfologi, stratigrafi, struktur geologi serta analisis laboratorium seperti petrografi dan mineragrafi. Hasil penelitian mendapatkan satuan geomorfologi punggungan vulkanik Motomboto dan satuan perbukitan erosional Motomboto. Hasil analisis stratigrafi dan analisis petrografi didapatkan satuan latit, satuan riolit porfiri, satuan breksi vulkanik dan satuan endapan aluvial. Hasil dari analisis struktur geologi mendapatkan arah umum kekar NE-SW, NW-SE, N-S, NEE-SWW dan sesar terdiri sesar geser dan sesar normal. Secara megaskopis dan analisis mineragrafi, mineral logam yang teramati adalah pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, tenanntit-tetrahedrit, kovelit, arsenopirit, emas dan azurit. Hasil analisis kontrol struktur terhadap mineralisasi, mineralisasi terbatas pada breksi hidrotermal yang merupakan batuan hasil dari zona hancuran zona sesar, kemudian terisi oleh fluida hidrotermal yang membawa mineral ekonomis. Struktur geologi daerah penelitian dapat menjadi jalur masuk fluida hidrotermal.

Kata-kata kunci*:* Struktur geologi, Mineralisasi, Breksi hidrotermal, Motomboto.

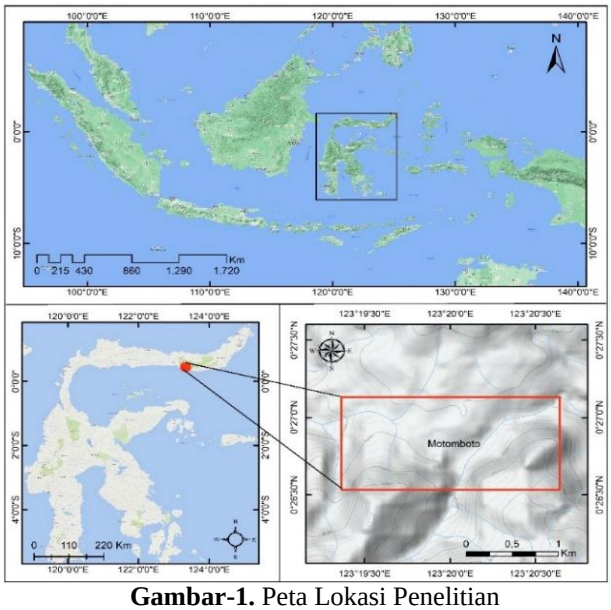
PENDAHULUAN

Secara geografis, Lengan Utara Sulawesi terletak pada kondisi tektonik yang kompleks, yakni berupa tunjaman dari lempeng sangihe, lempeng laut sulawesi (celebes) dan kolisi banggai sula [6] serta memanjang dari leher Pulau Sulawesi sampai Busur Sulawesi Utara [9]. Pergerakan lempeng menghasilkan aktivitas magmatisme dan sesar-sesar aktif [12]. Terbentuknya sesar-sesar lokal yang aktif disamping mempengaruhi deformasi batuan hingga hancur, juga membentuk alur topografi yang terjal [8], atau membentuk kelerengan yang curam memiliki kerawanan longsor yang tinggi [16] serta berpotensi menjadi jalur masuknya fluida hidrotermal yang membawa logam-logam yang bernilai ekonomis. Oleh karena itu, Lengan Utara Sulawesi merupakan wilayah yang memiliki sumber daya ekonomis yang cukup melimpah dengan berbagai tipe endapan mineral, umumnya merupakan endapan sulfidasi rendah, endapan sulfidasi tinggi, endapan porfiri, VMS, jasperoid Au dan magnetik skarn Au [10].

Gorontalo merupakan salah satu daerah yang memiliki beberapa lokasi penambangan emas rakyat di setiap Kabupaten, yaitu Kabupaten Pohuwato (Gunung Pani dan Bulontio), Kabupaten Boalemo (Bilato), Kabupaten Bone Bolango (Tulabolo), dan Kabupaten Gorontalo Utara (Hulawa dan Ilangata) [2], dan dibuktikan dengan purusahaan-perusahaan tambang yang beroperasi di daerah ini. Sebagian besar daerah ini ditempati oleh batuan gunungapi tersier [14]. Daerah penelitian Motomboto masuk diwilayah kontrak karya PT. Gorontalo Mineral dan tipe endapan mineral yang berkembang di Motomboto adalah tipe sistem sulfidasi tinggi.

Mineral bijih terutama emas merupakan salah satu kebutuhan dasar manusia. Seiring dengan berkembangnya zaman, kebutuhan akan sumberdaya mineral bijih pun semakin meningkat [3]. Karakteristik geologi regional daerah penelitian umumnya terdiri atasurutan gunungapi-sedimen dengan alterasi dan mineralisasi yang di kontrol oleh struktur geologi [13]

Penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya telah membahas tentang kondisi geologi, alterasi dan mineralisasi di prospek Motomboto, akan tetapi masih belum membahas secara mendalam mengenai kondisi geologi dan struktur geologi yang mengontrol alterasi dan mineralisasinya. Oleh karena itu, peneliti berinisiatif untuk menganalisis kontrol struktur geologi terhadap mineralisasi di daerah penelitian.

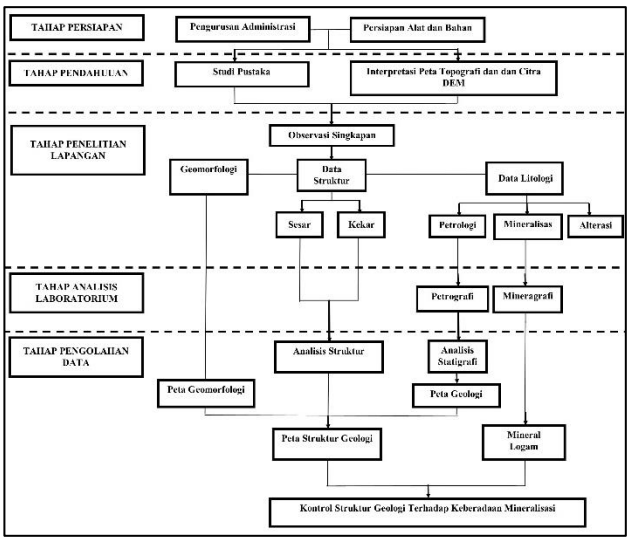


Gambar-1. Peta Lokasi Penelitian

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan (Gambar-2). Tahap persiapan meliputi pengurusan administrasi dan mempersiapkan peralatan lapangan seperti GPS Garmin, palu geologi, kompas brunton, loup 30x-60x, *scractcher pen*, HCL, kantong sampel dan alat tulis. Tahap pendahuluan berupa studi pustaka dan interpretasi peta topografi untuk memperoleh hipotesis awal mengenai daerah penelitian. Tahap penelitian lapangan diawali

dengan penentuan titik lokasi pengamatan berdasarkan data GPS dan kemudian melakukan observasi singkapan. Pengambilan sampel menggunakan metode *random sampling* dengan tetap memperhatikan keterwakilan suatu sampel litologi didaerah penelitian. Tahap analisis laboratorium menggunakan analisis petrografi dan mineragrafi. Tahap pengolahan data terdiri dari analisis stratigrafi dan analisis struktur geologi yang dikaitkan dengan mineralisasi daerah penelitian.

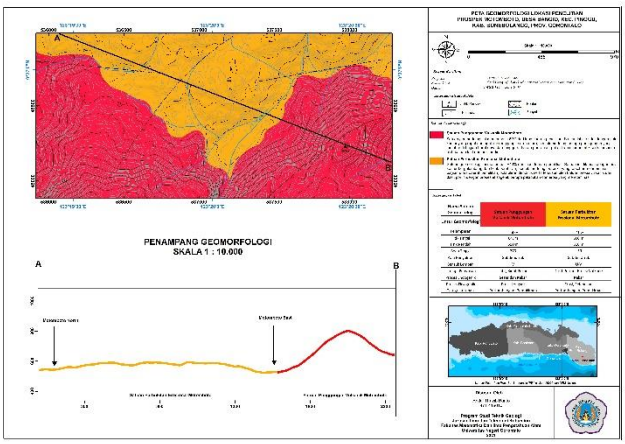


Gambar-2. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN DISKUSI

Kondisi Geomorfologi

Berdasarkan pengamatan geomorfologi dilapangan, pembagian satuan geomorfologi didasarkan pada klasifikasi Bentuk Muka Bumi [4] terdiri atas satuan punggungan vulkanik Motomboto dan satuan perbukitan erosional Motomboto.



Gambar-3. Peta Satuan Geomorfologi

Pembagian pola aliran sungai didasarkan pada klasifikasi Howard, 1967 [5] dan pembagian stadia sungai dasarkan pada klasifikasi Lobeck, 1939 [11].

a) Satuan Geomorfologi

1. Satuan Punggungan Vulkanik Motomboto

Satuan geomorfologi ini menempati ±60% dari luas daerah penelitian. Satuan ini ditandai dengan pola kontur yang rapat dan agak merenggang kearah utara, bentuk morfologi berupa punggungan yang berkembang di bagian barat daya dan tenggara daerah penelitian. Satuan ini berada pada elevasi 500-849 mdpl (gambar-4).

Kemiringan lereng yang mendominasi pada satuan ini berkisar antara curam hingga terjal (30%-140%). Secara umum sungai pada satuan ini masuk pada tahap muda dengan lembah berbentuk V, berpola aliran rektangular serta tersusun oleh batuan latit dan riolit porfiri yang mendominasi. Proses endogen yang berkembang pada satuan ini berupa dan kekar dan sesar serta proses eksogenik berupa erosi. Penamaan satuan ini didasarkan pada morfometri berupa punggungan dan penambahan vulkanik didasarkan pada litologi penyusunnya.

2. Satuan Perbukitan Erosional Motomboto

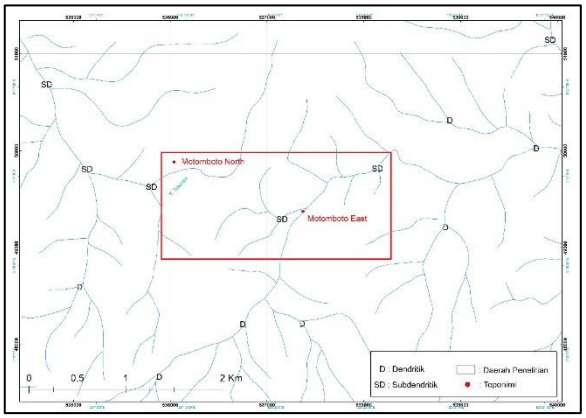
Satuan geomorfologi ini menempati ±40% dari luas dearah penelitian. Satuan ini ditandai dengan pola kontur bergelombang dan tidak beraturan, bentuk morfologi berbukit yang tersebar mendominasi bagian utara daerah penelitian serta berada pada elevasi 500-650 meter (Gambar-4).

Kemiringan lereng pada satuan ini berkisar antara datar hingga curam (2%-70%). Secara umum bentuk sungai pada satuan ini masuk pada tahap dewasa, pola aliran yang subdendritik serta tersusun oleh batuan breksi vulkanik dan dasit porfiri. Proses eksogenik yang berkembang berupa pelapukan dan erosi yang mendominasi. Penamaan satuan ini didasarkan pada morfometri berupa perbukitan dan penambahan erosional berdasarkan proses eksogen berupa erosi.

Gambar-4. Satuan Geomorfologi

b) Pola Aliran Sungai

Berdasarkan klasifikasi dari Howard (1966), analisis pola aliran sungai di daerah penelitian memperlihatkan pola subdendritik. Pola aliran sub-dendritik dicirikan seperti membentuk percabangan menyebar seperti pohon dan umumnya dapat dikontrol oleh litologi ataupun struktur geologi.



Gambar-5. Pola Aliran Sungai

Genetika sungai lokasi penelitian secara umum menunjukkan aliran sungai konsekuen. Aliran sungai konsekuen adalah aliran sungai yang mengalir searah dengan kemiringan lereng atau topografi aslinya.

c) Stadia Sungai

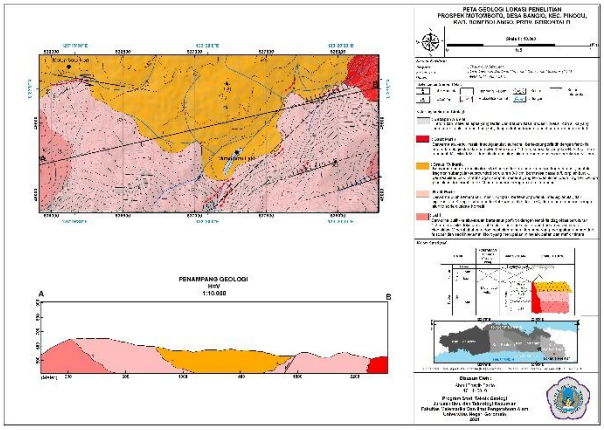
Stadia sungai merupakan suatu derajat tingkatan erosional pada suatu daerah dan pada waktu tertentu. Stadia sungai ditafsirkan berdasarkan pada pola aliran sungai, bentuk morfologi dan ciri-ciri lainnya. Tingkat perkembangan suatu morfologi setempat dengan besar kecilnya proses permukaan akan bergantung pada tingkat stadia sungai [11].

Stadia sungai di daerah penelitian dibagi menjadi 2, yaitu stadia muda dan stadia dewasa. Stadia muda di daerah penelitian sering dijumpai pada hulu sungai dan dicirikan dengan lembah sungai yang relatif curam, dalam hal ini erosi vertikal lebih dominan bekerja, bentuk lembah seperti "V" dan umumnya mengalir diatas di batuan yang masih tersingkap. (Gambar-6)

Gambar-6. Stadia Sungai

Kondisi Litologi

Berdasarkan pengamatan lapangan, Daerah penelitian tersusun dari batuan yang berumur pliosen atas, tersusun dari litologi latit, riolit porfiri, breksi vulkanik, dasit porfiri dan endapan aluvial.



Gambar-7. Peta Geologi Daerah Penelitian

a) Satuan latit

Satuan ini menempati ±20% dari total luas daerah penelitian, berwarna abu-abu terang-gelap, masif, porfiritik, mineral yang teramati adalah plagioklas serta mineral ubahan terdiri dari mineral lempung dan klorit.

b) Satuan riolit porfiri

Satuan ini menempati luas ±30%, berwarna putih kemerahan, masif, porfiritik, inequigranular, mineral kuarsa lebih dari 10% dan ortoklas. Mineral ubahan berupa mineral alunit dan mineral oksidasi jarosit dan goetit.

c) Satuan breksi vulkanik

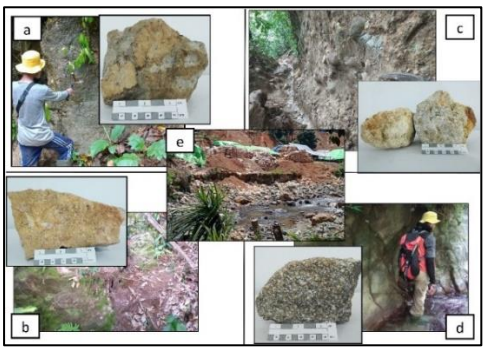
Satuan ini menempati ±25%, berwarna abu-abu kecoklatan, monomik dengan fragmen dasit, subangular-subrounded berukuran 3-9 cm, matriks tuff kasar dan kurang kompak. Mineral yang teramati berupa plagioklas dan hornblen serta mineral ubahan berupa mineral lempung *(clay altered)*. Satuan ini tidak memungkinkan untuk dipetrografi karena kondisi batuan mudah rapuh disebabkan oleh intensnya alterasi *clay minerali* dan pelapukan yang cukup tinggi.

d) Satuan dasit porfiri

Satuan menempati luas ±18%, berwarna abu-abu, masif, inequigranular, porfiritik, fenokris terdiri dari plagioklas dan hornblen, kuarsa kurang dari ±5%, biotit dan magnetit.

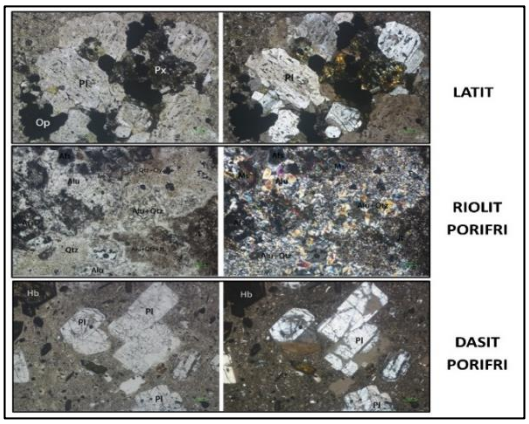
e) Satuan endapan aluvial

Satuan ini menempati luas ±7%, terdiri dari material lepas yang yang berukuran pasir kasar sampai bongkah, dengan tingkat kebundaran berkisar dari sub-rounded-rounded. Terdiri dari batuan dasit, andesit, breksi, dan batuan tersilifikasi



Gambar-8. Singkapan dan litologi daerah penelitian.

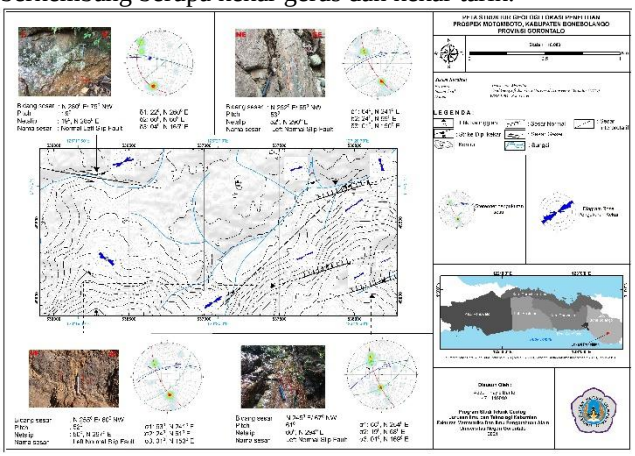
Secara mikroskopis Satuan latit, riolit porfiri, dan dasit porfiri (Gambar-9) dapat diamati secara mikroskopis menggunakan analisis petrografi.



Gambar-9. Kenampakan petrografi.

Struktur Geologi

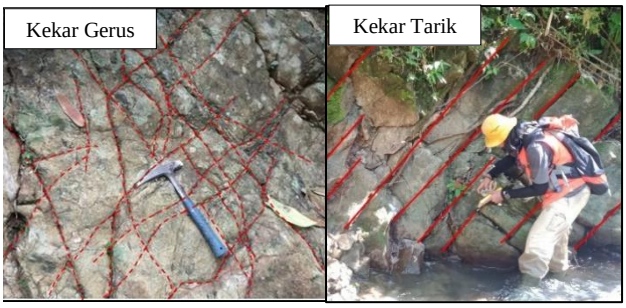
Berdasarkan pengamatan dilapangan, struktur geologi yang ditemukan adalah kekar dan sesar. Kekar yang berkembang berupa kekar gerus dan kekar tarik.



Gambar-10. Peta Struktur Geologi

a) Kekar

Kenampakan kekar gerus dilapangan umumnya berpasangan yang dicirikan dengan bidang permukaan relatif rata. Berdasarkan geometrinya, kekar gerus di daerah penelitian memperlihatkan bentuk yang tidak sistematis dengan bukaan yang relatif sempit (1-3 mm), orientasi berbelok-belok, tidak terisi oleh mineral. Kekar tarik umumnya tidak berpasangan dan dicirikan dengan permukaan yang kasar. Berdasarkan geometrinya, kekar tarik di daerah penelitian memperlihatkan bentuk yang sistematis, bukaannya berkisar 5-20 mm, orientasi yang lurus dan dibeberapa tempat terisi oleh mineral sulfida dan mineral oksida. Arah umum dari kekar tarik didapatkan arah NE-SW, NW-SE, N-S, NEE-SWW



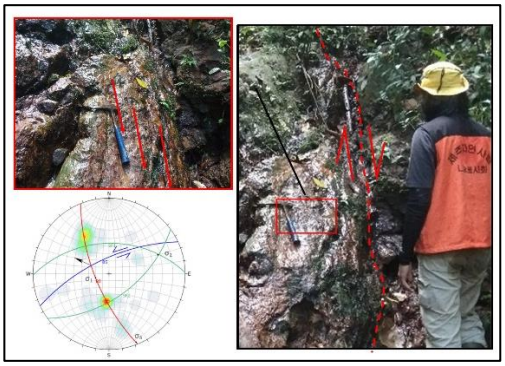
Gambar-11. Kenampakan kekar gerus dan kekar tarik.

b) Sesar

Daerah penelitian terdapat tiga sesar dengan dua pola, yakni Sesar Turun Mengiri Motomboto *East* 1, Sesar Turun Mengiri Motomboto *East* 2, Sesar Turun Mengiri Motomboto *East* 3 dan Sesar Geser Motomboto *North*.

1. Sesar Turun Mengiri Motomboto *East* 1.

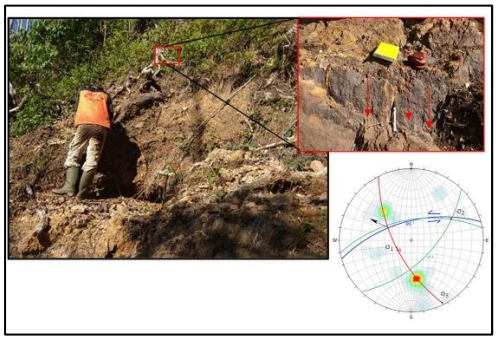
Keberadaan sesar ini dapat teramati pada kelurusan sungai pada peta topografi dan dapat diamati di lapangan berupa cermin sesar. Geometri dari sesar ini memiliki kedudukan N 245^0 E/ 67^0 NW, *pitch* 61^0, dan *netslip* 60^0, N 294^0 E. Hasil analisis kinematika untuk penamaan sesar didasarkan pada besaran dip dan *pitch* menurut klasifikasi Rickard (1972) dan mendapatkan nama *Left Normal Slip Fault.* Berdasarkan analisis dinamika didapatkan σ1: 66^0, N 254^0 E, σ2: 19^0, N 68^0 E dan σ3: 01^0, N 169^0 E.



Gambar-12 Kenampakan sesar turun mengiri Motomboto *East* 1

2. Sesar Turun Mengiri Motomboto *East* 2.

Keberadaan sesar ini dapat teramati pada kelurusan sungai pada peta topografi dan dapat diamati di lapangan berupa cermin sesar. Geometri dari sesar ini memiliki kedudukan N 255^0 E/ 60^0 NW, *pitch* 52^0, dan *netslip* 50^0, N 297^0 E. Hasil analisis kinematika untuk penamaan sesar didasarkan pada besaran dip dan *pitch* menurut klasifikasi Rickard (1972) dan mendapatkan nama *Left Normal Slip Fault.* Berdasarkan analisis dinamika didapatkan σ1: 63^0, N 241^0 E, σ2: 24^0, N 61^0 E dan σ3: 01^0, N 153^0 E

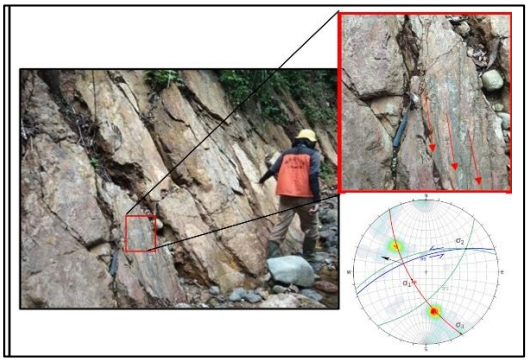


Gambar-13 Kenampakan sesar turu mengiri Motomboto *East* 2

3. Sesar Turun Mengiri Motomboto *East* 3.

. Keberadaan sesar ini dapat teramati pada kelurusan sungai pada peta topografi dan dapat diamati di lapangan berupa cermin sesar. Geometri dari sesar ini memiliki kedudukan N 252^0 E/ 65^0 NW, *pitch* 53^0, dan *netslip* 52^0, N 290^0 E. Hasil analisis kinematika untuk penamaan sesar didasarkan pada besaran dip dan *pitch* menurut klasifikasi

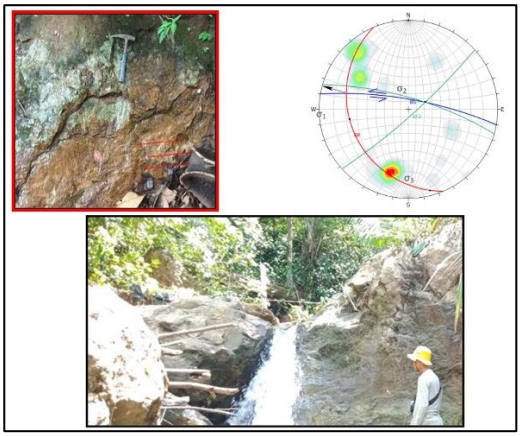
Rickard (1972) dan mendapatkan nama *Left Normal Slip Fault.* Berdasarkan analisis dinamika didapatkan σ1: 64^0, N 241^0 E, σ2: 24^0, N 59^0 E dan σ3: 01^0, N 150^0 E.



Gambar-14 Kenampakan sesar turu mengiri Motomboto *East* 3

4. Sesar Geser Mengiri Motomboto *North*.

Keberadaan sesar ini dapat teramati pada kelurusan sungai pada peta topografi dan dapat diamati di lapangan berupa cermin sesar. Geometri dari sesar ini memiliki kedudukan N 280^0 E/ 79^0 NW, *pitch* 19^0, dan *netslip* 19^0, N 285^0 E. Hasil analisis kinematika untuk penamaan sesar didasarkan pada besaran dip dan *pitch* menurut klasifikasi Rickard (1972) dan mendapatkan nama *Left Normal Slip Fault.* Berdasarkan analisis dinamika didapatkan σ1: 22^0, N 260^0 E, σ2: 66^0, N 66^0 E dan σ3: 04^0, N 165^0 E.



Gambar-15 Kenampakan sesar geser mengiri Motomboto *North*

Mekanisme Struktur Geologi

Data struktur geologi yang diambil di lapangan serta analisis kinematik dan dinamiknya dapat membantu kita untuk dapat menginterpretasi sejarah deformasi yang membentuk struktur geologi daerah penelitian, baik jenis, arah dan tektonik yang mempengaruhi.

Berdasarkan evolusi geologi di distrik Tombulilato, perkembangan tektonik di wilayah ini berawal dari terjadinya beberapa peristiwa periode tektonik yang mempengaruhi, dimulai dari bergeraknya mikrokontinen Sula dari arah tenggara ke arah barat laut lengan utara sulawesi, peristiwa tektonik ini terbentuk pada kala Miosen Atas-Pliosen Bawah, menghasilkan busur vulkano plutonik yang terkait dengan subduksi, dinamai dengan Busur Bilungala atau Bilungala Vulkanik [13].

Waktu pertengahan antara kala pliosen bawah dan pliosen atas, terjadi tumbukan benua mikro Sula dibagian selatan lengan utara Sulawesi. Peristiwa ini menjadi proses akhir dari magmatisme gunung api Bilungala dan mengakibatkan beberapa tempat di distrik mengalami sesar naik.

Pada kala pliosen atas, proses magmatisme di wilayah ini diaktifkan kembali, diperkirakan proses ini di akibatkan oleh terjadinya tumbukan lempeng sangihe dengan lengan utara sulawesi yang berarah relatif timur-barat dan menghasilkan Busur Motomboto (*Motomboto Arc*) (Perello, 1994).

Setelah tahap vulkanisme terbentuk, tahap selanjutnya menghasilkan zona sesar interpretatif yang memicu naiknya fluida hidrotermal yang membawa mineralisasi logam tipe endapan epitermal sulfidasi tinggi pada tubuh breksi hidrotermal. Struktur ini diasumsikan merupakan struktur *syn-mineralization* di daerah penelitian.

Setelah pembetukan mineralisasi, ada reaktivasi strutkur geologi dari tektonik yang sama dan menghasilkan jenis sesar geser di daerah penelitian yang merupakan sesar geser mengiri motomboto north berarah relatif timur-barat dan *step normal fault* di daerah penelitian yang berarah relatif NEE-SWW. Sesar ini adalah sesar turun mengiri motomboto east 1, sesar turun mengiri motomboto east 2 dan sesar turun mengiri motomboto east 3. Struktur yang terbentuk terakhir ini merupakan struktur post-mineralisasi karena memotong mineralisasi sebelumnya.

Kontrol Struktur Geologi Terhadap Keberadaan Mineralisasi

Struktur geologi yang terbentuk dalam suatu wilayah biasanya berhubungan erat dengan sistem tektonik yang bekerja secara regional. Setiap gaya kompresi yang bekerja dan melewati batas plastis batuan akan menghasilkan rekahan berupa kekar gerus dan kekar tarikan.

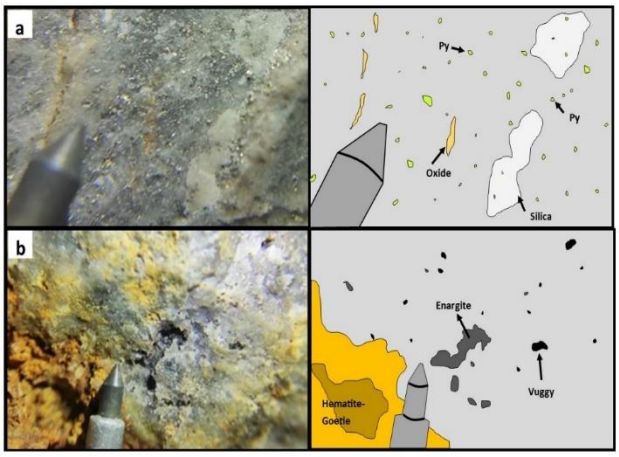
Kekar gerus akan berkembang menjadi sesar dan kekar tarikan akan berkembang menjadi vein jika ada aktifitas injeksi larutan hidrotermal. Karena setiap potensi bukaan, baik yang di jumpai pada kekar atau sesar akan menjadi jalur masuknya sistim hidrotermal yang membawa mineralisasi.

a). Mineralisasi Endapan Sulfidasi Tinggi

Hasil pengamatan di lapangan, jalur mineralisasi ini sudah mengalami proses oksidasi dengan intensitas sedang sampai kuat, sehingga mineral sulfida dijumpai tidak merata disepanjang jalur mineralisasi. Sedangkan yang dijumpai hampir merata adalah hasil proses oksidasi mineral sulfida yaitu berupa hematit, goetit dan jarosit yang mengisi rekahan dan melapisi batuan. Sedangkan mineral seperti emas, masih tertinggal pada zona oksidasi yang kemudian ini menjadi target deposit emas yang ditambang oleh penambang rakyat setempat dan terletak relatif dekat dengan permukaan.

Mineralisasi endapan sulfidasi tinggi di daerah penelitian dicirikan dengan tekstur *vuggy silica* dengan kehadiran mineralisasi yang umum dijumpai tersebar merata (diseminasi) atau mengisi (*infilling*) (Gambar-16). Mineralisasi dengan tekstur diseminasi umumnya berupa pirit-kalkopirit, sedangkan tekstur *vuggy* umumnya terisi oleh mineral sulfida berupa enargite dan pirit, serta mineral oksidasi hematit-goetit yang menggantikan mineral sulfida sebelumnya. Umumnya tipe ini berasosiasi pada wilayah

zona sesar atau bukaan tempat jalur fluida hidrotermal. Keterdapatan mineralisasi di daerah penelitian umumnya hadir pada litologi breksi hidrotermal.



Gambar-16 *Style* Mineralisasi

Dalam sistem endapan sulfidasi tinggi, alterasi dan mineralisasi di kontrol oleh struktur geologi (Goldfiel, Rodalquilar, Nalesbitan), litologi (Publo Viejo, Nansatsu) atau kombinasi keduanya (Lepanto) [1]. Pada sistem ini, *ore body* hadir sebagai tubuh di zona struktur utama dan tidak sebagai *vein system*. *Vein* mungkin penting dalam endapan sulfidasi tinggi, tetapi sebagian besar terdiri dari bijih yang terdiseminasi, menggantikan dan *leaching* mineral dari batuan sampingnya yang berada pada zona struktur utama [7]. Sehingganya di daerah penelitian kurang berkembang sistem *vein* karena sangat minor maupun jarang di jumpai di permukaan.

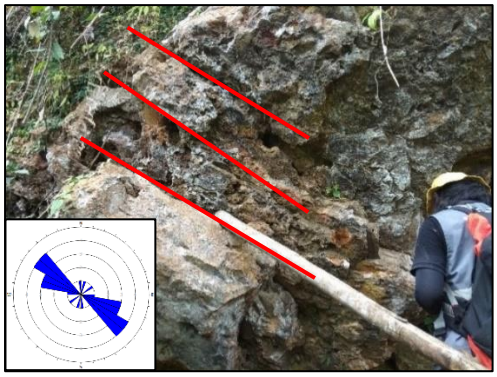
Hal ini dikarenakan jarak tubuh magmatik terhadap endapan sulfidasi tinggi relatif lebih dekat dan waktu interaksi dengan air meteorik tidak berlangsung lama. Kemudian didukung fluida dari endapan sulfidasi tinggi lebih bersifat asam dan bertekanan tinggi sehingga memiliki kemampuan lebih besar untuk bisa langsung menerobos keatas melalui jalur struktur utama.

Struktur geologi di daerah telitian berupa rekahan dan patahan memegang peranan penting sebagai jalur naiknya fluida hidrothermal karena merupakan zona lemah atau zona hancuran, sehingga memiliki sifat lebih permeabel dibandingkan batuan sekitarnya. Pada awalnya larutan hidrotermal sulfida tinggi yang naik melalui zona lemah tersebut memiliki sifat yang sangat asam atau mempunyai nilai potensial hidrogen (pH) ≤ 2 sehingga menyebabkan terjadinya proses pelindian (*leaching*) untuk setiap masa batuan yang dilaluinya sehingga meninggalkan jejak berupa tekstur *vuggy silica*. Adanya pengaruh air meteorik menyebabkan nilai pH naik mendekati netral dan pada saat inilah mulai diendapkan mineral logam seperti enargit. Pengamatan dilapangan dari contoh *hand specimen* mineral energite dijumpai berasosiasi dengan pirit dan berkembang baik di dalam tekstur *vuggy silica*.

Di daerah telitian mineralisasi berasosiasi dengan zona breksi hidrotermal, ataupun batuan samping yang dekat dengan zona sesar. Umumnya keterdapatan mineralisasi di daerah penelitian memiliki kandungan mineral-mineral logam seperti emas, pirit, arsenopirit, kalkopirit, galena, sfalerit, enargit, tennantite-tetrahedrite, covellite dan azurit dan sebagian besar telah mengalami oksidasi sedang-tinggi.

b). Struktur Pre-Mineralisasi

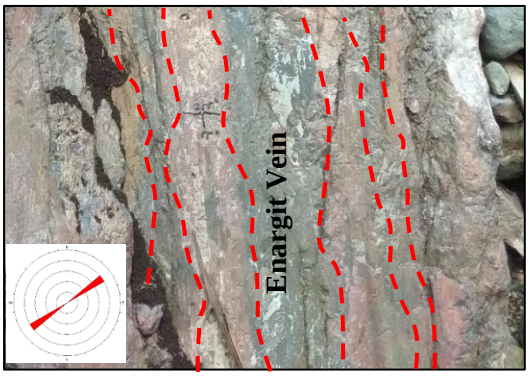
Struktur geologi yang terbentuk sebelum terjadinya alterasi dan mineralisasi dari proses hidrotermal dinamakan *pre-mineralization structure*. Di daerah penelitian struktur ini berupa rekahan yang berarah umum NW-SE dan tidak terisi oleh mineralisasi.



Gambar-17. Struktur Pre-Mineralisasi

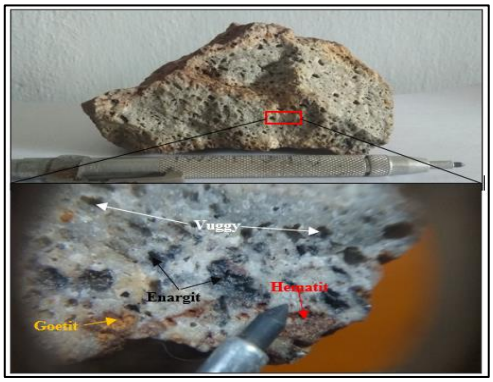
c). Struktur Syn-Mineralisasi

Struktur geologi yang terbentuk bersamaan dengan alterasi dan mineralisasi dari proses hidrotermal dinamakan *Syn-Mineralization Structure*. Di daerah penelitian struktur ini berupa sesar interpretatif berdasarkan dari sebaran breksi hidrotermal dan vein yang berarah umum NE-SW.



Gambar-18 Struktur Sin-mineralisasi berupa *vein* enargit di daerah penelitian.

Sesar interpretatif ini didalamnya membentuk zona hancuran berupa *fault breccia*, kemudian akan di isi oleh fluida hidrotermal dan menjadi *vein* breksi hidrotermal karena memperlihatkan tekstur *breccia*. Jika tidak memperlihatkan tekstur *breccia* maka namanya jadi *vein* masif. Fluida yang keluar ini membawa logam dan tersebar di bagian barat laut, selatan dan timur laut daerah penelitian. Dibuktikan dengan adanya mineralisasi tipe endapan sulfidasi tinggi berupa enargit dan mineral logam lainnya yang mengisi lubang *vuggy silica* dan tersebar (*disseminated)* pada matriks dari breksi hidrotermal di zona tersebut.

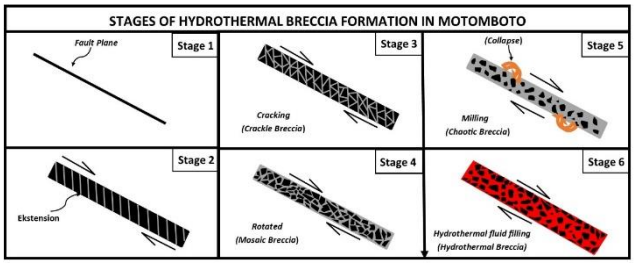


Gambar-19 *Vuggy silica* dan enargit

Enargit ($CuAsS_4$) didaerah penelitian (gambar 4.31) diperkirakan terbentuk dari unsur-unsur logam yang dibawa oleh fluida hidrotermal yang berasal dari magma. Fluida dengan kondisi tekanan dan temperatur tinggi serta kondisi yang asam, unsur logam berupa Au dan Cu harus berikatan dengan molekul ligan seperti Cl atau HS, misalnya $Au(Cl)_2$ atau $Au(HS)_2$ (Arribas, 1995) dan $Cu(Cl)_2$ (Corbett and Leach, 1997). Arah dari sebaran breksi hidrotermal yang menjadi tubuh mineralisasi ini tidak dapat diukur seperti halnya mengukur kedudukan struktur, karena tubuh dari breksi hidrotermal itu sendiri berbentuk *Irregular Body*. Oleh karena itu, Arahnya dapat diinterpretasikan dari kenampakan kelurusan yang berarah timur laut – barat daya, arah umum rekahan yang terisi mineralisasi, sebaran mineralisasi yang hanya terbatas dan berorientasi sepanjang pada zona breksi hidrotermal, serta dengan melacak sebaran lubang-lubang tambang rakyat. Karena sebagian besar penambang tersebut membuat lubang pada zona breksi hidrotermal dan tubuh batuan di sekitarnya

Breksi Hidrotermal

Breksi hidrotermal di daerah penelitian di interpretasikan merupakan hasil pergerakan sesar yang didalamnya membentuk zona lemah. Pada awalnya menghasilkan rekahan ekstensional dan berkembang menjadi banyak dengan pola yang tidak teratur membentuk tekstur seperti breksi (*crackle breccia*). Kemudian menjadi *mosaic breccia* ketika fragmen mengalami sedikit rotasi. Seiring waktu, sebagian fragmen menjadi *rock flour* karena tergerus ataupun mengalami *collapse*, sehingga bercampur dengan fragmen fragmen batuan lainnya yang menghasilkan fragmen yang polimik, dan kebundarannya menjadi subagular- subrounded karena ada prosess *milling*. Proses ini membentuk *chaotic breccia*. Pada fase akhir, ketiga tipe genetik breksi ini terisi oleh fluida hidrotermal yang membawa logam-logam dari bawah permukaan

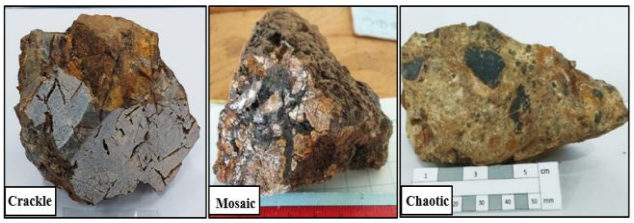


Gambar-20 Mekanisme pembentukan breksi hidrotermal

Kondisi fisik singkapan breksi hidrotermal fresh berwarna ke abu-abuan dan terkekarkan. Batuan ini dijumpai pada jalur sungai Tulabolo dan jalur sungai Motomboto

Gambar-21 Singkapan breksi hidrotermal.

Secara megaskopis, batuan ini berwarna kecoklatan, matriks-*clast supported*, monomik-polimik, bentuk fragmen subangular-subrounded berukuran 1,5-8 cm, bermassa dasar silika, dan terpilah buruk. Mineral yang teridentifikasi berupa feldspar pada *clast*, dan mineral ubahan silika-alunite, keterdapatan tekstur *vuggy* yang terisi mineralisasi enargit, diseminasi pirit serta mineral oksidasi seperti hematit dan goetit.



Gambar-22 *Handspesimen* breksi hidrotermal

Breksi hidrotermal di daerah penelitian merupakan tubuh dari mineralisasi yang dibuktikan dengan kenampakan logam-logam yang terlihat secara megaskopis maupun pada sayatan poles mineragrafi. Adapun sampel breksi hidrotermal yang mewakili untuk di analisis mineragrafi adalah sampel stasiun AB07, AB14, dan AB22. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona struktur bukaan yang berperan menjadi jalur keluarnya fluida yang membawa mineralisasi. Dibuktikan dengan adanya keterdapatan mineral logam yang intens diwilayah tersebut, kerena tidak semua bukaan bisa menjadi tempat terendapkannya mineralisasi.

a) Breksi Hidrotermal Stasiun AB07

Kenampakan mikroskopis pada sayatan poles, mineral bijih terdiri dari pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, dan tennantite-tetrahedrite. Tekstur mineralisasi pada umumya tersebar, mengisi rekahan ataupun *vuggy* dan menggantikan mineral yang terbentuk sebelumnya.

Mineral yang tersebar terdiri dari pirit berukuran sangat halus 01 – 05 µm, dan yang berukuran besar terdiri dari pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, dan tennantite-tetrahedrite berukuran hingga 300 µm.

1. Pirit (FeS_2)

Pirit *b*erwarna putih kekuningan, reflektivitas tinggi sehingga lebih terang dari pada kalkopirit, memiliki bentuk kubik sebagian subhedral, dan isotrop. Butiran pirit berukuran 05 µm - 100µm dan sebagian tergantikan oleh

mineral kalkopirit namun masih memperlihatkan bentuk kubik dari mineral. pirit dan kalkopirit sebagian memperlihatkan bentuk parallel dengan tekstur kataklastik.

2. Kalkopirit ($CuFeS_2$)

Kalkopirit berwarna kuning muda jika berasosiasi dengan galena dan kuning tua jika menggantikan pirit. Kalkopirit berukuran halus (30 µm – 50 µm) *intergrowth* dengan galena dan yang berbentuk anhedral menggantikan mineral pirit. Reflektivitas medium, belahan jelek, anisotropy lemah, dan tetragonal.

3. Galena (PbS_2)

Galena berwarna putih, belahan sempurna, reflektivitas tinggi, isotropik, internal refleksi coklat kemerahan dan sebagian memperlihatkan triangular pits pada tubuh kristal. Galena berukuran 50 µm – 100 µm, bentuk subhedral – euhedral, relief tinggi, pada umumnya terisolasi dan sebagian berikatan dengan mineral kalkopirit dan sfalerit.

4. Sfalerit (ZnS)

Sfalerit berwarna abu-abu, reflektivitas rendah, isotrop, dan tidak memperlihatkan internal refleksi. Ukuran butir mineral sangat halus 50 µm – 40 µm, bentuk kubik anhedral, terlihat pula mineral terbentuk dicelah butiran mineral gangue, pada ruang antara mineral dan pada tepi mineral gangue yang panjangnya hingga 1.5 mm.

5. Tennantite-Tetrahedrite ($Cu_{12}As_4S_{13} – Cu_{12}SbS_{13}$)

Tennantite-Tetrahedrite berwarna abu-abu kebiruan, reflektivitas rendah, isotrop, dan memperlihatkan internal refleksi kebiruan dan kemerahan. Ukuran butir mineral berupa solid-solution 50 µm – 110 µm, beberapa berbentuk kubik anhedral. Umumnya berikatan dengan mineral kalkopirit dan sfalerit.

Gambar-23 Mineragrafi AB07

b) Breksi Hidrotermal Stasiun AB14

Kenampakan mikroskopis pada sayatan poles, mineral bijih terdiri dari pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, tennantite-tetrahedrite, arsenopirit dan covellite. Tekstur mineralisasi pada umumya tersebar, mengisi rekahan ataupun *vuggy* dan menggantikan mineral yang terbentuk sebelumnya. Mineral yang tersebar terdiri dari pirite dan sfalerit berukuran sangat halus 05 – 10 µm, dan yang berukuran besar terdiri dari pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, tennantite-tetrahedrite dan arsenopirit berukuran hingga 100 µm.

1. Pirit (FeS_2)

Pirit berwarna putih kekuningan, reflektivitas tinggi sehingga lebih terang dari pada kalkopirit, memiliki bentuk kubik sebagian subhedral, dan isotrop. Butiran pirit berukuran halus berbentuk granular (05 - 10µm), dan yang mengisi rekahan bertekstur kataklastik berukuran 50 - 100 µm. Selain itu sebagian tergantikan oleh mineral kalkopirit dan galena namun masih memperlihatkan bentuk kubik dari mineral.

2. Kalkopirit ($CuFeS_2$)

Kalkopirit berwarna kuning muda jika berasosiasi dengan galena dan kuning tua jika menggantikan pyrite. Kalkopirit berukuran halus (01 µm – 05 µm) *intergrowth* dengan galena dan yang berbentuk anhedral menggantikan mineral pirit. Reflektivitas medium, belahan buruk, anisotropy lemah, dan tetragonal.

3. Galena (PbS_2)

Galena berwarna putih, belahan sempurna, reflektivitas tinggi, isotropik, internal refleksi coklat kemerahan dan sebagian memperlihatkan *triangular pits* pada tubuh kristal. Berukuran sangat halus 03 µm – 05 µm, bentuk subhedral – euhedral, relief tinggi, umumnya terisolasi dan sebagian berikatan dengan mineral kalkopirit.

4. Sfalerit (ZnS)

Sfalerit berwarna abu-abu, reflektivitas rendah, isotrop, dan tidak memperlihatkan internal refleksi, Ukuran butir mineral sangat halus 03 µm – 05 µm, bentuk kubik anhedral, terlihat mineral terbentuk dicelah butiran mineral gangue yang panjangnya 100 µm.

5. Tennantite-Tetrahedrite ($Cu_{12}As_4S_{13} – Cu_{12}SbS_{13}$)

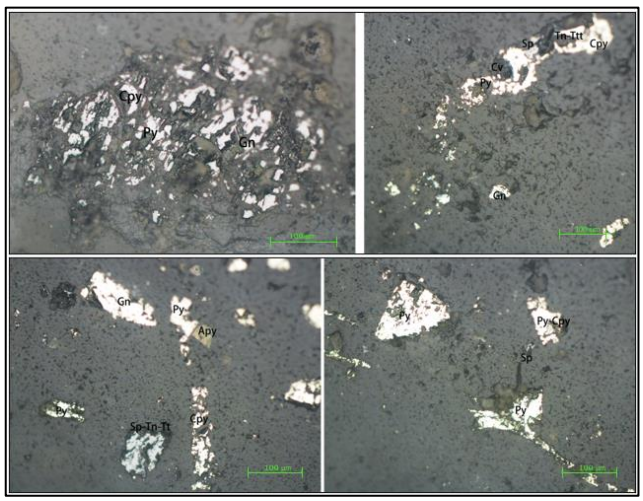
Tennantite-Tetrahedrite berwarna abu-abu kebiruan, reflektivitas rendah, isotrop, dan memperlihatkan internal refleksi kebiruan dan kemerahan. Ukuran butir mineral berupa solid-solution 10 µm – 50 µm, beberapa berbentuk kubik anhedral. Umumnya berikatan dengan mineral kalkopirit dan sfalarit.

6. *Covellite* (CuS)

Berwarna biru, belahan sempurna, reflektivitas rendah, anisotropik kecoklatan, hadir bersama kalkopirit. Terdapat pula berupa bercak pada kalkopirit, berbutir halus (01µm – 03 µm) dan berbentuk anhedral pada rekahan yang tidak teratur.

7. Arsenopirit (FeAsS)

Arsenopirit berwarna putih keabu-abuan, anisotrop kecoklatan, reflektivitas menengah, belahan baik, dan dicirikan oleh kembaran lamellar. Mineral hadir berukuran 20 µm – 70 µm, bentuk subhedral - euhedral, membentuk ikatan kompleks dengan pirit.



Gambar-24 Mineragrafi AB14

c) Breksi Hidrotermal Stasiun AB22

Secara mikroskopis, mineral bijih terdiri dari pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, covellite, tennantite-tetrahedrite, dan emas. Tekstur mineralisasi umumnya tersebar, mengisi rekahan dan *vuggy* dan menggantikan mineral yang terbentuk sebelumnya. Mineral yang tersebar terdiri dari pirit dan sfalerit berukuran sangat halus 05 – 10 µm, dan yang berukuran besar terdiri dari pirit, kalkopirit, galena, sfalerit, dan tennantite-tetrahedrite berukuran hingga 100 µm.

1. Pirit (FeS_2)

Pirit berwarna putih kekuningan, reflektivitas tinggi sehingga lebih terang dari pada kalkopirit, memiliki bentuk kubik sebagian subhedral, dan isotrop. Butiran pirit berukuran 05 µm - 100µm dan sebagian tergantikan oleh mineral kalkopirit namun masih memperlihatkan bentuk kubik dari mineral. Pirit dan kalkopirit sebagian memperlihatkan bentuk parallel dengan tekstur kataklastik.

2. Kalkopirit ($CuFeS_2$)

Kalkopirit berwarna kuning muda jika berasosiasi dengan galena dan kuning tua jika menggantikan pirit. kalkopirit berukuran halus (01 µm – 05 µm) *intergrowth* dengan galena dan yang berbentuk anhedral menggantikan mineral pyrite. Reflektivitas medium, belahan jelek, anisotropy lemah, dan tetragonal.

3. Galena (PbS_2)

Galena berwarna putih, belahan sempurna, reflektivitas tinggi, isotropik, internal refleksi coklat kemerahan, sebagian memperlihatkan triangular pits pada tubuh kristal. Galena berukuran 03 µm – 05 µm, subhedral – euhedral, relief tinggi, pada umumnya terisolasi dan sebagian berikatan dengan mineral *chalcopyrite.*

4. Sfalerit (ZnS)

Sfalerit berwarna abu-abu, reflektivitas rendah, isotrop, dan tidak memperlihatkan internal refleksi, Ukuran 03 µm – 05 µm, bentuk kubik anhedral, terlihat mineral terbentuk dicelah butiran mineral gangue yang panjangnya 100 µm.

5. Tennantite-Tetrahedrite ($Cu_{12}As_4S_{13}$ – $Cu_{12}SbS_{13}$)

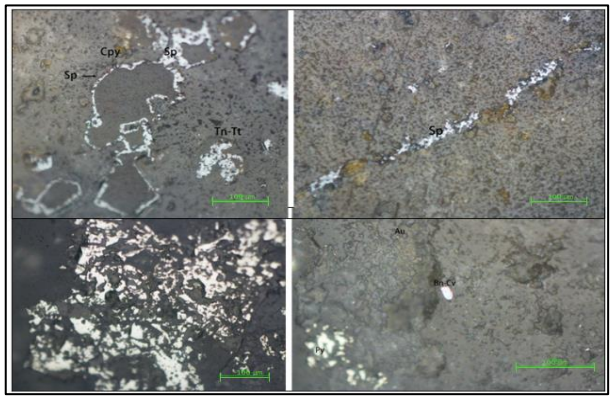
Tennantite-Tetrahedrite berwarna abu-abu kebiruan, reflektivitas rendah, isotrop, dan memperlihatkan internal refleksi kebiruan dan kemerahan. Ukuran butir mineral berupa solid-solution 10 µm – 50 µm, beberapa berbentuk kubik anhedral. Umumnya berikatan dengan mineral kalkopirt dan sfalerit.

6. *Covellite* (CuS)

Berwarna biru, belahan sempurna, reflektivitas rendah, anisotropik kecoklatan, hadir berupa butiran terisolasi. Terdapat pula berupa bercak pada kalkopirit, berbutir halus (01µm – 03 µm) dan berbentuk anhedral pada rekahan yang tidak teratur.

7. Emas (Au)

Emas berwarna kuning terang, isotrop, reflekstivitas tinggi, berbentuk euhedral - subhedral, berukuran 01 µm - 02µm dan terisolasi terhadap mineral bijih yang lain.

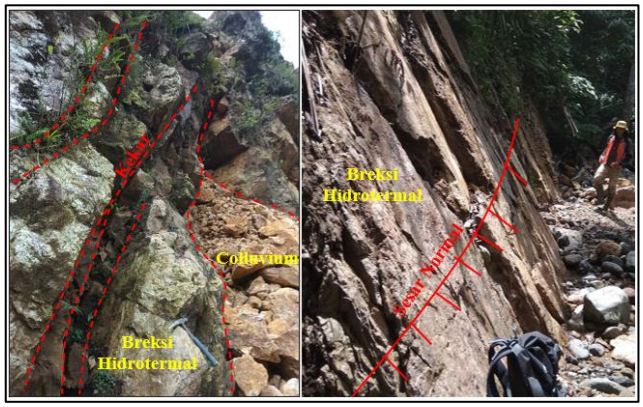


Gambar-25 Mineragrafi AB22

Berdasarkan uraian diatas, keterdapatan mineralisasi pada breksi hidrotermal tersebut cukup intens, terutama mineral-mineral logam yang hanya bisa terbentuk dari proses hidrotermal dalam kondisi asam seperti enargit dan Tennantite-Tetrahedrite, karena mineral logam tersebut berasal dari fluida langsung dan bukan dari proses pengkayaan mineralisasi (*secondary process)* pada umumnya. Hal ini dapat membuktikan bahwa adanya kontrol struktur yang membuat fluida naik dan membawa mineralisasi di zona yang ada breksi hidrotermal. Karena pada dasarnya breksi hidrotermal akibat dari kontrol struktur akan menjadi permeabilitas yang baik untuk terendapkan mineral logam yang ekonomis.

d) Struktur Post – Mineralisasi

Setelah proses alterasi dan mineralisasi terbentuk, kemudian di potong oleh *Post-Mineralization Structure*. Struktur pasca mineralisasi di daerah penelitian adalah rekahan yang berarah N-S dan NEE-SWW serta sesar normal yang berarah relatif timur laut-barat daya. Sesar pasca mineralisasi ini umumnya memotong batuan breksi hidrotermal yang membawa mineralisasi karena terdapat cermin sesar pada batuan tersebut.



Gambar-26 Struktur Pasca-Mineralisasi daerah penelitan.

Struktur geologi juga dapat memicu perusakan ataupun pengayaan mineralisasi yang sudah ada sebelumnya. Hal ini dikarenakan air permukaan yang masuk ke dalam rekahan atau patahan, melarutkan dan mengoksidasi logam-logam yang dilaluinya, sehingga melepaskan ion-ion bebas seperti Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+} Ag^{2+} dan sebagainya.

Ion-ion tersebut mengalami presipitasi atau mengendap sebagai oksida, karbonat, dan sulfat diatas air tanah, contohnya adalah azurit. Azurit di daerah penelitian

hadir dengan volume yang sedikit dan berasosiasi dengan mineral pirit. Ketika melewati batas air tanah, maka logam yang terbentuk berupa logam *supergent* seperti covelite yang teramati pada sayatan poles.

Gambar-27 Kenampakan azurit dan pirit.

KESIMPULAN

Telah dilakukan riset terhadap kontrol struktur terhadap mineralisasi endapan sulfidasi tinggi di Motomboto. Hasil penelitian menunjukkan geomorfologi daerah penelitian terdiri dari 3 satuan yakni, satuan perbukitan erosional Motomboto dan satuan punggungan vulkanik Motomboto. Stratigrafi batuan yang dijumpai didaerah penelitian tersusun dari latit, riolit porfiri, breksi vulkanik, dasit porfiri dan endapan aluvial. Data-data struktur geologi yang didapat dilapangan serta analisis struktur geologinya diklasifikasikan menjadi dua, yaitu kekar dan sesar. Kekar didaerah penelitian terdiri dari kekar tarik dan kekar gerus Sesar yang berkembang didaerah penelitian terdiri dari Sesar Turun Mengiri Motomboto East 1, Sesar Turun Mengiri Motomboto East 2, Sesar Turun Mengiri Motomboto East 3 dan Sesar Geser Mengiri Motombo North

Mineralisasi yang ditemukan didaerah penelitian terdiri dari Enargite, Tenannite-tetrahedrite, emas, Pirit, Kalkopirit, covellite, galena, sfalerit, arsenopirit dan Azurit. Peranan struktur geologi terhadap keberadaan mineralisasi sebagai jalur tempat naiknya larutan hidrothermal sulfida tinggi, ini terlihat dari penyebaran mineralisasi yang terbatas hanya pada zona struktur yang di dalamnya merupakan batuan breksi hidrotermal sebagai tubuh mineralisasi. Struktur yang mengontrol mineralisasi berupa sesar interpretatif yang berkembang di Motomboto North maupun di Motomboto East. Adanya struktur *post-mineraliazation* berupa sesar normal terbentuk setelah aktifitas hidrotermal dan memotong mineralisasi yang sudah ada sebelumnya.

SARAN

Untuk penelitian selanjutnya dapat menganalisis inklusi fluida dan membuat rekonstruksi struktur geologi geologi daerah penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Gorontalo Minerals yang telah memberi dukungan dalam bentuk pendanaan, fasilitas, atau legalitas terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Arribas Jr, A. 1995. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluid. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, *23*, 419-454.

[2] Arifin, Y. I., Sakakibara, M., & Sera, K. 2015. Impacts of artisanal and small-scale gold mining (ASGM) on environment and human health of Gorontalo Utara Regency, Gorontalo Province, Indonesia. *Geosciences*, *5*(2), 160-176.

[3] Bakkar, U. Z., Kasim, M., Akase, N., & Rompo, A. I. 2020. Karakteristik Alterasi dan Mineralisasi Hidrotermal Daerah Hulawa, Gorontalo, Indonesia. *Jambura Geoscience Review*, *2*(1), 1-15.

[4] Brahmantyo, B., dan Salim, B. 2006. Klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Landform) untuk Pemetaan Geomorfologi pada Skala 1: 25.000 dan Aplikasinya untuk Penataan Ruang. *Jurnal Geoaplika*, *1*(2), 071-078.

[5] Howard, A. D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG bulletin*, *51*(11), 2246-2259.

[6] Hall, R., & Spakman, W. (2015). Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, *658*, 14-45.

[7] Hedenquist, J. W., Matsuhisa, Y., Izawa, E., White, N. C., Giggenbach, W. F., & Aoki, M. (1994). Geology, geochemistry, and origin of high sulfidation Cu-Au mineralization in the Nansatsu district, Japan. *Economic Geology*, *89*(1), 1-30.

[8] Hutagalung. R, 2013. *Analisis Gerakan Tanah Pada Batuan Granite Daerah Leato Provinsi Gorontalo*. Tesis. Universitas Hasanuddin

[9] Irfan, U. R., Nur, I., & Kasim, M. 2017. Hydrothermal Alteration Mineralogy Associated with Gold Mineralization in Buladu Area, Gorontalo, Northern Sulawesi, Indonesia.

[10] Kavalieris, I., Van Leeuwen, T. M., & Wilson, M. 1992. Geological setting and styles of mineralization, north arm of Sulawesi, Indonesia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, *7*(2-3), 113-129.

[11] Lobeck, A. K. 1939. *Geomorphology, an introduction to the study of landscapes* (No. 551.4 L797). McGraw-Hill Book Company, inc.

[12] Manyoe, I. N. 2017. Kajian Geologi Daerah Panas Bumi Lombongo Kabupaten Bone Bolango Provinsi Gorontalo. *Jurnal Geomine*, *5*(1).

[13] Perelló, J. 1994. Geology, porphyry Cu-Au, and epithermal Cu-Au-Ag mineralization of the Tombulilato district, North Sulawesi,

Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, *50*(1-3), 221-256.

[14] Permana, A. P. 2017. Analisis stratigrafi Daerah Tanjung Kramat Kecamatan Hulonthalangi Kota Gorontalo. *Jurnal Geomine*, *5*(1).

[15] Rickard, W.H., 1972, *Physical modeling of structural*, pp. RH-I -RH-9 In Federal Research Natural Areas in Oregon and Washington.

[16] Zainuri. A dan Kasim.M, 2018. Analisis Kelongsoran Badan Jalan Menggunakan Aplikasi Metode Geolistrik Electrical Resistivity Tomography (ERT), Northern Gorontalo. *Proceedings*. *Pertemuan Ilmiah Tahunan IGI XX*. Manado.