

SKRIPSI

MATERIAL TYPE CHARACTERIZATION AND CORRELATION WITH ORE PERFORMANCE PB4 AND PB5 GRASBERG BLOCK CAVE UNDERGROUND MINING AT PT. FREEPORT INDONESIA

Disusun dan diajukan oleh

**TURIBIUS WAHYU INSAN NUGROHO
D061 19 1060**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



KEMENTERIAN PENDIDIKAN KEBUDAYAAN RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS HASANUDDIN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK GEOLOGI

***MATERIAL TYPE CHARACTERIZATION AND
CORRELATION WITH ORE PERFORMANCE PB4 AND PB5 GRASBERG
BLOCK CAVE UNDERGROUND MINING AT
PT. FREEPORT INDONESIA***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T)
pada Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

OLEH :
TURIBIUS WAHYU INSAN NUGROHO
D061 19 1060



GOWA
2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

MATERIAL TYPE CHARACTERIZATION AND CORRELATION WITH ORE PERFORMANCE PB4 AND PB5 GRASBERG BLOCK CAVE UNDERGROUND MINING AT PT. FREEPORT INDONESIA

Disusun dan diajukan oleh

TURIBIUS WAHYU INSAN NUGROHO
D061 19 1060

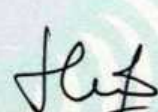
Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Geologi
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 27 Februari 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Dr. Ulva Ria Irfan, S.T., M.T
NIP. 19700606 199412 2 001


Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng
NIP. 19771214 200501 1 002

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Geologi
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin


Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng
NIP. 19771214 200501 1 002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Turibius Wahyu Insan Nugroho
 NIM : D061 19 1060
 Program Studi : Teknik Geologi
 Jenjang : S1

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulisan saya berjudul

***“MATERIAL TYPE CHARACTERIZATION AND CORRELATION WITH
 ORE PERFORMANCE PB4 AND PB5 GRASBERG BLOCK CAVE
 UNDERGROUND MINING AT PT. FREEPORT INDONESIA”***

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

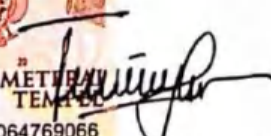
Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 16 Januari 2024



Optimized using
 trial version
www.balesio.com

Yang Menyatakan



96FALX064769066
 Turibius Wahyu Insan Nugroho
 NIM. D061 19 1060

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SARI	iii
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR ISTILAH ASING	xv
KATA PENGANTAR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Maksud dan Tujuan	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Lokasi Penelitian dan Kesampaian Daerah	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Geologi Regional	5
2.1.1. Geomorfologi Regional	5
2.1.2. Stratigrafi Regional	7
2.1.3. Tektonik Regional	11
2.2. Alterasi dan Mineralisasi	12
2.2.1. Alterasi Hidrothermal	12
2.2.1.1. Zona Alterasi	14
2.2.2. Endapan Hidrothermal	17
2.2.3. Endapan Porfiri	19
2.2.3.1. Penyebaran	21
2. Jenis Endapan Porfiri	22
3. Model Endapan Porfiri	25
Endapan Skarn	27



2.2.4.1. Mineralogi dan Alterasi.....	28
2.2.4.2. Tipe Zonasi Mineralisasi Bijih.....	30
2.2.4.3. Klasifikasi Skarn	32
2.2.4.4. Geometri dan Tatanan Tektonik.....	35
2.3. Geometalurgi	36
2.3.1. Pengolahan Bahan Galian.....	37
2.4. <i>Material Type Zone</i>	38
2.5. Karakteristik <i>Problematic Ore</i>	39
BAB III METODE DAN TAHAP PENELITIAN.....	40
3.1. Tahapan Pendahuluan	40
3.2. Tahapan Pengumpulan Data	41
3.3. Tahap Analisis Data	41
3.3.1. Pengolahan Data	41
3.3.2. Analisis Laboratorium	42
3.4. Tahap Penyusunan Laporan	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1. Satuan Litologi Daerah Penelitian	45
4.1.1. <i>Tersier Grasberg Dalam Diorite Intrusion (TGDD)</i>	48
4.1.1.1. Ciri Litologi	48
4.1.1.2. Persebaran	51
4.1.2. <i>Tersier Grasberg Dalam Fragmental Andesite intrusion (TGDFa)</i>	51
4.1.1.1. Ciri Litologi.....	51
4.1.1.2. Persebaran	53
4.2. Zona Alterasi Daerah Penelitian	53
4.2.1. <i>Potassic</i>	56
4.2.2. <i>Phyllic</i>	56
4.2.3. <i>Silicified</i>	57
4.2.4. <i>Replacement Sulphide</i>	57
4.2.5. <i>Skarn</i>	58
4.2.5.1. <i>Marble</i>	58
4.2.5.2. <i>Material Type Zone</i> Daerah Penelitian	59
4.2.5.3. <i>Dalam Stockwork (DSTK)</i>	62



4.3.2. <i>Dalam Coarse (DC)</i>	62
4.3.3. <i>Dalam Fine Zone (DFZ)</i>	66
4.3.4. <i>Heavy Sulfide Zone (HSZ)</i>	68
4.3.5. <i>Sediment (SED)</i>	72
4.4. <i>Problematic Ore Daerah Penelitian</i>	75
BAB V PENUTUP	79
5.1. Kesimpulan	79
5.2. Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN	82



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Peta Geologi Regional Lembar Timika Dengan Skala 1:250.000 ...	5
Gambar 2	Peta Geologi <i>Grasberg Minerals District</i> (PTFI)	7
Gambar 3	<i>Stratigraphy of Grasberg Minerals District</i> (PTFI)	7
Gambar 4	Diagram hubungan antara suhu-pH dan jenis alterasi serta himpunan mineral-mineral pencirinya. (Corbett & Leach, 1996.....	17
Gambar 5	Skematik diagram dari jenis-jenis endapan hidrotermal	18
Gambar 6	Penampang skematik sebuah endapan tembaga porfiri.....	20
Gambar 7	Skema tipe endapan dan model konseptual penampang endapan tembaga porfiri (dimodifikasi dari Sillitoe, 2010)	21
Gambar 8	Penyebaran endapan tembaga porifiri di dunia (Sillitoe, 2010).....	22
Gambar 9	4 Model skematik asal-usul dan proses pembentukan dari macam macam jenis endapan porfiri (Cu,Mo, W) (Robb, 2005)	24
Gambar 10	Kenampakan skematik dari zona alterasi hidrotermal (a) dan mineralisasi (b) pada sistem endapan tembaga-molibdenit porfiri berdasarkan Lowel & Guilbert (1970)	26
Gambar 11	Diagram proses pembentukan endapan skarn yang sederhana Pemanasan yang terjadi pada batugamping dan penambahan unsur silica, aluminium dan unsur-unsur lainnya yang berasal dari magma yang mengintrusi menghasilkan sebuah daerah kontak yang berbentuk halo yang mengandung mineral yang kaya akan <i>calcium silicate</i>)	28
Gambar 12	Mineralogi endapan skarn. (Meinert, dkk. 2005).....	29
Gambar 13	Zonasi alterasi yang umumnya ditunjukkan oleh suatu endapan skarn yang berasosiasi dengan endapan porfiri. A =argilik, QSP phyllic = quartz-sericit-pyrite, P = Propilitik, K = potasik. (Eunaudi, 1982: Meinart, dkk. 2000).	31
Gambar 14	Model endapan skarn yang memperlihatkan tipe endapan eksoskarn dan endoskarn beserta kumpulan mineralogi dan mineral bijih yang terbentuk (Meinert, 1998).	33



Gambar 15 Berbagai disiplin ilmu yang penting dalam geometalurgi diadaptasi dari William and Richardson (2004).....	37
Gambar 16 Skema proses pengolahan dan peleburan bijih emas	38
Gambar 17 Diagram Alur Tahapan Penelitian.....	43
Gambar 18 Diagram Alur Pemodelan Dalam <i>Software</i>	44
Gambar 19 Peta Litologi Penelitian Pada Level 2850 PB4 dan PB5 di <i>overlay</i> dengan drill hole Vd1 berisikan data litologi	46
Gambar 20 Peta Litologi Penelitian Pada Level 2830 PB4 dan PB5 di <i>overlay</i> dengan drill hole Vd1 berisikan data litologi	47
Gambar 21 Kenampakan singkapan dan megaskopis conto batuan TGDD pada stasiun drift GBC PB4 DD18-S Level 2850	48
Gambar 22 Kenampakan sayatan tipis DD18-S yang menunjukkan kehadiran mineral alterasi berupa serisit (ser), kuarsa (Qz), dan mineral Opak (Opq)	49
Gambar 23 Kenampakan mikroskopis sayatan poles DD18-S terdiri dari mineral pirit (Py), kovelit (Cv), dan kalkopirit (Cpy) sebagai mineral <i>replacement</i> dari pirit	49
Gambar 24 Kenampakan singkapan dan megaskopis conto batuan TGDD pada stasiun drift GBC PB4 DP63-S Level 2830	50
Gambar 25 Kenampakan sayatan tipis DP63-S yang menunjukkan kehadiran mineral alterasi berupa serisit (ser), kuarsa (Qz), dan mineral Opak (Opq).	50
Gambar 26 Kenampakan mikroskopis sayatan poles DP63-S terdiri dari mineral pirit (Py) dan kovelit (Cv)	51
Gambar 27 Kenampakan singkapan dan megaskopis conto batuan TGDD pada stasiun drift GBC PB4 P12 Level 2830	52
Gambar 28 Kenampakan sayatan tipis P12 yang menunjukkan kehadiran mineral alterasi berupa serisit (ser), kuarsa (Qz), dan mineral opak (Opq) ...	52
Gambar 29 Kenampakan mikroskopis sayatan poles P12 terdiri dari mineral pirit (Py) dan kovelit (Cv).....	53
30 Kenampakan zona alterasi daerah penelitian pada level 2850 di <i>overlay</i> dengan 6 sumur bor <i>drill hole</i>	54



Gambar 31	Kenampakan zona alterasi daerah penelitian pada level 2850 di overlay dengan 6 sumur bor <i>drill hole</i>	55
Gambar 32	Validasi <i>core box</i> GBC-01GE-05 pada zona alterasi <i>potassic</i>	56
Gambar 33	Validasi <i>core box</i> GRD-47-06 pada zona alterasi <i>phyllic</i>	56
Gambar 34	Validasi <i>core box</i> KL98-10-21 pada zona alterasi <i>silicified</i>	57
Gambar 35	Validasi <i>core box</i> GRD-47-08 pada zona alterasi <i>replacement sulphide</i>	57
Gambar 36	Validasi <i>core box</i> KL32-13 pada zona alterasi <i>skarn</i>	58
Gambar 37	Validasi <i>core box</i> GRD47-08 pada zona alterasi <i>marble</i>	58
Gambar 38	Kenampakan <i>material type zone</i> daerah penelitian pada level 2850 di overlay dengan <i>data pointload is50Mpa</i>	60
Gambar 39	Kenampakan <i>material type zone</i> daerah penelitian pada level 2830 di overlay dengan <i>data pointload is50Mpa</i>	61
Gambar 40	Grafik <i>boxplot material type dalam coarse</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB4.....	64
Gambar 41	Grafik <i>boxplot material type dalam coarse</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB5	64
Gambar 42	Validasi grafik <i>boxplot material type dalam coarse</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> GBC85-03GE-01 pada area PB4.....	65
Gambar 43	Validasi grafik <i>boxplot material type dalam coarse</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> GBC85-03GE-02 pada area PB5	65
Gambar 44	Grafik <i>boxplot material type dalam fine zone</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB4.....	66
Gambar 45	Grafik <i>boxplot material type dalam fine zone</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB5.....	67
Gambar 46	Validasi grafik <i>boxplot material type dalam coarse</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> GBC85-03GE-01 pada area PB4 dan PB5.	68
Gambar 47	Grafik <i>boxplot material type heavy sulfide zone</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB4.....	69
18	Grafik <i>boxplot material type heavy sulfide zone</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB5.....	70



Gambar 49 Validasi grafik <i>boxplot material type heavy sulfide zone</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> GRD35-08 pada area PB4.....	71
Gambar 50 Validasi grafik <i>boxplot material type heavy sulfide zone</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> GRD47-03 pada area PB5.....	71
Gambar 51 Grafik <i>boxplot material type sediment</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB4	72
Gambar 52 Grafik <i>boxplot material type sediment</i> vs data mineralogi (Vd52) area PB5	73
Gambar 53 Validasi grafik <i>boxplot material type sediment</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> KL98-10-21 pada area PB4.....	74
Gambar 54 Validasi grafik <i>boxplot material type sediment</i> vs data mineralogi (Vd52) dengan <i>corebox</i> GBC71-01GE-02 pada area PB5.....	75
Gambar 55 Kenampakan <i>problematic ore</i> daerah penelitian pada level 2850 di <i>overlay</i> dengan <i>drill hole ID (clay, pyrite, and sericite)</i>	76
Gambar 56 Kenampakan <i>problematic ore</i> daerah penelitian pada level 2830 di <i>overlay</i> dengan <i>drill hole ID (clay, pyrite, and sericite)</i>	77



DAFTAR TABEL

Tabel 1	Tipe-tipe alterasi berdasarkan himpunan mineral	16
Tabel 2	Daftar tipe alterasi dan kumpulan mineral serta sulfida yang dijumpai pada sistem endapan porfiri	26
Tabel 3	Karakteristik dari beberapa tipe endapan skarn berdasarkan kandungan logam.....	35
Tabel 4	Klasifikasi pembentukan <i>material type</i> daerah penelitian.	59
Tabel 5	Klasifikasi <i>pointload</i> mengacu pada standar ISRM yang dimodifikasi PTFI	59



DAFTAR ISTILAH ASING

<i>Assay Data</i>	: Data yang dihasilkan berdasarkan analisis kualitas suatu sampel atau bahan lainnya.
<i>Block cave</i>	: Sebuah metode penambangan (bawah permukaan tanah) yang menggunakan teknik meruntuhkan bagian bawah dari badan bijih, sehingga bijih akan runtuh arena bertanya sendiri.
<i>Boundary</i>	: Garis yang menandai batas suatu daerah.
<i>Boxplot</i>	: Ringkasan distribusi sampel yang disajikan secara grafis yang di gambarkan dalam bentuk distribusi data, ukuran tendensi sentral dan ukuran penyebaran data pengamatan.
<i>Cave</i>	: Ruang kosong yang terbentuk akibat penambangan dengan menggunakan metode <i>block cave</i> yang akan terus tumbuh hingga mencapai permukaan (sudah matang).
<i>Corebox</i>	: Kotak kayu, logam, atau karton yang dibagi menjadi beberapa bagian paralel sempit untuk menyimpan sampel hasil dari pengeboran dalam bentuk silinder.
<i>Disseminated</i>	: Tersebar keseluruh tubuh atau organ.
<i>Drill Report</i>	: Pelaporan hasil pengeboran dalam bentuk laporan.
<i>Extraction</i>	: Sebuah area tambang yang memiliki fungsi bukaan untuk mengambil material bijih yang sudah runtuh, merupakan jenis bukaan yang permanen, bukaannya bernama <i>panel</i> , dan <i>drawpoint</i> , <i>drawbell</i> terdapat pada area ini.
<i>Forecast</i>	: Prediksi atau estimasi kejadian di masa depan yang berkaitan dengan keuangan.
<i>Drill Drift</i>	: Sebuah bukaan pada area undercut.
<i>Highland</i>	: Area tertutup PT. Freeport yang berada di pegunungan Tembagapura.
<i>Jobsite</i>	: Area kerja sebuah perusahaan
<i>icle</i>	: Kendaraan yang dirancang untuk mengangkut muatan atau penumpang dalam skala kecil dengan batasb ketentuan tertentu.



<i>Lowland</i>	: Area tertutup PT. Freeport yang berada di pedataran Tembagapura.
<i>Mill</i>	: Sebuah bangunan atau pabrik yang memiliki mesin penggiling dalam sebuah tambang.
<i>Open pit</i>	: Metode penambangan pada permukaan.
<i>Ore Body</i>	: Deposit mineral/massa bijih dalam jumlah besar, dibawah kerak bumi.
<i>Ore Grade</i>	: Tingkat/persentasi kualitas kandungan logam dalam bijih
<i>Ore Perfomance</i>	: Bijih logam yang sesuai kriteria untuk menentukan seberapa baik unit produksi pertambangan kedepannya.
<i>Overlay</i>	: Menutupi permukaan (sesuatu) dengan lapisan.
<i>Pointload</i>	: Tes yang bertujuan untuk mengetahui karakterisasi mekanika batuan dari segi kekuatannya.
<i>Polished Section</i>	: Sayatan poles yang diamati menggunakan mikroskop dari hasil preparasi sepotong batuan.
<i>Problematic Ore</i>	: Perlakuan terhadap tipe bijih yang bermasalah.
<i>Production Block</i>	: Area produksi yang sudah diperhitungkan semua bahan/material yang di produksi.
<i>Replacement</i>	: proses menggantikan sebuah objek atau sesuatu.
<i>Rock Schmidt</i>	: sebuah palu pantul yang digunakan untuk mengukur kekerasan, kekuatan, dan pengujian keseragaman formasi batuan dalam geologi.
<i>Stockwork</i>	: System kompleks vein yang berorientasi acak.
<i>Thin Section</i>	: Sayatan tipis yang diamati menggunakan mikroskop dengan tebal kurang lebih 0,03 milimeter dari hasil preparasi sepotong batuan.
<i>Throughput</i>	: Jumlah material atau barang yang melewati suatu siste atau proses.
<i>Undercut level</i>	: Sebuah area tambang yang memiliki fungsi bukaan untuk memulai proses pembentukan ruang runtuh, merupakan jenis bukaan yang sementara (karena akan terisi material bijih yang telah runtuh, dan bukaannya bernama <i>drill drift</i>).



KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya, sehingga saya dapat penyusunan Laporan Tugas Akhir yang berjudul ***“Material Type Characterization and Correlation With Ore Performance PB4 and PB5 Grasberg Block Cave Underground Mining PT. Freeport Indonesia”*** dapat berjalan lancar dan selesai dengan bantuan-Nya.

Laporan Tugas Akhir ini dibuat agar dapat melakukan penelitian pada PT. Freeport Indonesia. Penyusunan laporan ini tak lepas dari bantuan berbagai pihak. Maka penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr.-Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng. sebagai Ketua Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sekaligus sebagai Dosen Pembimbing Pendamping yang telah meluangkan waktu serta memberikan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Ibu Dr. Ulva Ria Irfan, S.T., M.T. sebagai Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu serta memberikan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Prof. Dr. Adi Tonggihroh, S.T., M.T dan Bapak Dr. Ir. Busthan Azikin M.T sebagai dosen penguji yang memberikan saran dan masukan kepada penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir ini menjadi lebih baik.
4. Bapak dan Ibu Dosen pada Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan nasehatnya.
5. Bapak dan Ibu Staf Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bantuannya dalam pengurusan administrasi penelitian.
6. Ibu Ani Akiriwapea selaku Koordinator Internship Divisi Learning and Organizational Development PTFI yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk dapat melaksanakan magang penelitian ini.
7. Pak Afdhal dan Pak Jemi yang berperan dalam semua administrasi Penulis lama magang penelitian ini



8. Bapak Dhani Hafli selaku Manager Geology Department, Divisi Geoengineering PTFI yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan kegiatan magang penelitian ini.
9. Bapak Andreas Yudha Sugiyanto selaku koordinator pembimbing penulis selama melaksanakan kegiatan magang penelitian ini di PT. Freeport Indonesia.
10. Bapak Wahyu Garjito dan Bang Rico Nouel selaku mentor/pembimbing lapangan penulis dalam kegiatan magang penelitian ini di PTFI yang dengan sabar telah meluangkan waktu memberikan bimbingan dalam penyusunan skripsi ini.
11. Special Project (Bapak Ivan, Bapak Ruswanto, Bapak Sombait, Bapak Yudha, Bapak Ical), Team Big Gossan (Pak Pormando, Mas Koko), Team DMLZ Production (Pak Fathony, Mas Dody, Mas Adi, Mas Ijan, Mas Robert), Team DMLZ Development (Pak Nanda, Pak Nimbrot, Mas Komeng, Mas Rizki), Team Kucing Liar Development (Mas Eko, Bang Ghana, Bang Bli Basten, Mas Andhika), Team GBC Production (Mas Teguh, Bang Rico, Mbak Dania), Team GBC Development (Pak Roy, Pak Michael, Mas Harry, Mbak Ola) dan seluruh kru MPAIGELAH yang memberikan bimbingan, ilmu, dan membantu penulis dalam kegiatan magang penelitian.
12. Ismu Ahmad, Adam Manggaprouw, dan Emanuel Yatipai sebagai teman seperjuangan magang di Undergorund Geology Department.
13. Bang Astian, Bang Ronal, Reza Ilmi, Faidel, Hadi, Haidir, Mas Bagas, Mas Reza, Resa, Ade, Arkhan, David, Anne, Aubrey, Aisyah, Risa dan teman-teman Internship Program 2023 PT. Freeport Indonesia.
14. Kedua Orang Tua tercinta yang telah memberikan dukungan semangat, doa hingga materil.
15. Saudara saya Virgilius Galih Widyo Raharnata, S.T yang telah memberikan semangat, doa hingga materil.



teman-teman Teknik Geologi 2019 (Jaeger) yang mendukung dan membantu dalam penyusunan laporan skripsi ini.

17. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, atas segala saran dan bantuan yang diberikan kepada penulis selama penyusunan laporan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih terdapat berbagai kelemahan dan kekurangan, sehingga kritik maupun saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk menyempurnakan laporan ini. Akhir kata saya mengucapkan terima kasih dan semoga Laporan Pemetaan geologi ini dapat bermanfaat bagi diri saya sendiri dan bagi orang lain yang menggunakannya.

Gowa, Januari 2024

Penulis



SARI

TURIBIUS WAHYU INSAN NUGROHO. *Material Type Characterization and Correlation With Ore Performance PB4 and PB5 Grasberg Block Cave Underground Mining PT. Freeport Indonesia* (dibimbing oleh Ulva Ria Irfan dan Hendra Pachri).

Tambang bawah tanah *Grasberg Block Cave* (GBC) terletak pada distrik pertambangan *estberg* di rentang tengah Papua dan merupakan salah satu area pertambangan bawah tanah dalam kontrak karya A (COW “A”) PT. Freeport Indonesia. Merupakan perpanjangan dalam dari mineralisasi yang membentang di bawah mineralisasi bijih cadangan *Grasberg* yaitu sebuah tambang terbuka yang berada di atasnya dengan produksi cadangan akhir 2017 adalah 963 juta ton bijih dengan kadar rata-rata 1,01 tembaga (Cu) dan 0,72 g/t emas (Au). Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui bagaimana karakteristik *material type* pada PB4 dan PB5 tambang *underground Grasberg Block Cave*, mengetahui kondisi *problematic ore* pada PB4 dan PB5 tambang *underground Grasberg Block Cave*. Penelitian ini dilakukan pada dua level yaitu 2850 (*undercut*) dan 2830 (*extraction*) area PB4 dan PB5 dengan metode pemetaan geologi agar dapat melakukan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD), petrografi, mineragrafi berdasarkan sampel batuan yang dilakukan di laboratorium dan melakukan perhitungan dinamis dengan formula rumus menggunakan *alteration data* (vd1), dan *mineralogy data* (vd52) yang berisikan data *assay*, *collar*, litologi, alterasi, *pointload*, dan *material type* berdasarkan dari literasi dari peneliti terdahulu pada daerah penelitian serta laporan akhir hasil pemboran yang kemudian diolah menggunakan aplikasi Microsoft Excel dan Maptek Vulcan 9.0. Hasil pengolahan dan analisis menunjukkan karakterisasi *material type* pada daerah penelitian ialah *dalam stockwork*, *dalam coarse*, *dalam fine zone*, *high sulfide zone*, dan *sediment* yang diketahui berdasarkan jenis litologinya ialah *Tersier Grasberg Dalam Diorite Intrusion* (TGDD) dan *Tersier Grasberg Dalam Fragmental Andesite Intrusion* (TGDFa) dengan jenis alterasi filik, silifikasi, *replacement sulphide*, dan *marble* pada area 1. Berdasarkan jenis tipe bijih yang bermasalah berdasarkan standar urgi Freeport Indonesia, yang telah diprediksi terdapat di *Grasberg Block*



Cave dipengaruhi oleh mineral pengotor seperti mineral serisit >10%, lempung 3-5%, dan pirit > 5% sehingga diketahui pada daerah penelitian adanya keterdapat *problematic ore* dan *clean ore*. Hal ini sangat membantu dalam penentuan metode operasional penambangan dan proses pengolahan di pabrik pengolahan yang diharapkan dapat mengurangi risiko menurunnya perolehan mineral tembaga dan emas dalam operasi penambangan dan pengolahan.

Kata Kunci: *Underground, Grasberg Block Cave, Material Type, Problematic Ore.*



ABSTRACT

TURIBIUS WAHYU INSAN NUGROHO. *Material Type Characterization and Correlation With Ore Performance PB4 and PB5 Grasberg Block Cave Underground Mining PT. Freeport Indonesia (mentored by Ulva Ria Irfan and Hendra Pachri).*

The Grasberg Block Cave (GBC) underground mine is located in the Estberg mining district in the central range of Papua and is one of the underground mining areas in contract work A (COW "A") PT. Freeport Indonesia. It is a deep extension of the mineralization that extends below the Grasberg ore reserve mineralization, namely an open-pit mine located above it with reserve production at the end of 2017 of 963 million tonnes of ore with an average grade of 1.01 copper (Cu) and 0.72 g/t gold (Au). The purpose of this study was to find out the characteristics of the material types in PB4 and PB5 of the Grasberg Block Cave underground mine, to find out the problematic ore conditions in PB4 and PB5 of the Grasberg Block Cave underground mine. This research was carried out at two levels, namely 2850 (undercut) and 2830 (extraction) areas PB4 and PB5 using geological mapping methods to be able to carry out X-Ray Diffraction (XRD), petrography, mineragraphy analysis based on rock samples carried out in the laboratory and carry out dynamic calculations. with a formula using alteration data (vd1), and mineralogy data (vd52) which contains assay, collar, lithology, alteration, pointload, and material type data based on the literacy of previous researchers in the research area as well as the final report of the results drilling which is then processed using Microsoft Excel and Maptek Vulcan 9.0 applications. The results of processing and analysis show that the characterization of material types in the research area is in stockwork, in coarse, in fine zone, high sulfide zone, and sediments which are known based on the type of lithology are Tertiary Grasberg in Diorite Intrusion (TGDD) and Tertiary Grasberg in Fragmental Andesite Intrusion (TGDFa) with potassic, phyllic, silification, replacement sulphide, and marble types in the research area. Based on the type of problematic ore based on PT Indonesia's geometallurgical standards, what has been predicted to be the Grasberg Block Cave is influenced by impurity minerals such as



sericite minerals >10%, clay 3-5%, and pyrite >5% so it is known that in the research area there are problematic ore and clean ore. This is very helpful in determining mining operational methods and processing processes at processing plants which are expected to reduce the risk of decreasing the recovery of copper and gold minerals in mining and processing operations.

Keywords: *Underground, Grasberg Block Cave, Material Type, Problematic Ore.*



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Negara Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumberdaya alam baik kekayaan alam mineral tambang maupun non tambang. Kekayaan alam ini harus dikelola dan dimanfaatkan sebaik dan seefisien mungkin. Kegiatan eksplorasi merupakan salah satu tahapan yang perlu dilakukan dalam mencari sumberdaya bijih tembaga yang memiliki nilai ekonomis aspek, yaitu aspek teknis dan aspek ekonomis. Kedua aspek tersebut merupakan langkah awal untuk mengevaluasi kegiatan eksplorasi, apakah sumberdaya tembaga tersebut layak atau tidak secara ekonomis untuk ditambang.

Kegiatan pertambangan bijih tembaga di Indonesia telah dilakukan sudah sejak lama, baik yang telah dimulai dari zaman penjajahan Belanda hingga Indonesia merdeka. Baik secara konvensional maupun dengan teknik yang telah jauh lebih berkembang seperti sekarang ini. Seiring dengan itu, berbagai metode karakteristik dan kontrol-kontrol mineralogi digunakan mengurangi kerugian akibat berkurangnya perolehan mineral-mineral bijih berharga.

PT Freeport Indonesia (PTFI) merupakan salah satu tambang tembaga yang menerapkan metode tambang bawah tanah (*underground*). Kegiatan operasi penambangan dengan menggunakan metode tambang bawah tanah (*underground*) sangat bergantung pada *ore performance* berdasarkan data geologi, alterasi dan *material type*. Metode penelitian yang digunakan untuk karakterisasi *material type* dan penaksiran *ore performance* menggunakan metode pemetaan geologi, jenis alterasi, dan analisis XRD sampel pemetaan bawah permukaan, serta analisis geometalurgi yang dilakukan di laboratorium. Jenis bijih yang bermasalah (*problematic ore*) berdasarkan standar geometalurgi Freeport Indonesia, seperti halnya di tambang terbuka Grasberg, diprediksi juga terdapat di Grasberg Block

3C). Pada kesempatan ini penulis ingin melakukan penelitian dengan judul *aterial Type Characterization and Correlation With Ore Perfomance PB4 Grasberg Block Cave Underground Mining PT. Freeport Indonesia*” pada



PT. Freeport Indonesia dan diharapkan mahasiswa dapat menerapkan ilmu yang telah diperoleh dan menambah ilmu baru untuk mendukung perkembangan dunia pertambangan di Indonesia.

1.2. Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan keilmuan mahasiswa dan menambah pengalaman serta pengetahuan dalam industri pertambangan.

Berikut adalah tujuan dilakukannya penelitian ini di PT. Freeport Indonesia :

1. Mengetahui karakteristik *Material Type* pada PB4 dan PB5 tambang *underground Grasberg Block Cave*.
2. Mengetahui kondisi *problematic ore* pada PB4 dan PB5 tambang *underground Grasberg Block Cave*.

1.3. Batasan Masalah

Adapun penulis membatasi permasalahan dalam penelitian pada karakteristik *material type* dengan korelasinya terhadap *ore performance* pada PB4 dan PB5 Tambang *Underground Grasberg Block Cave* (GBC), yaitu :

1. Pemetaan lapangan tidak dilakukan secara menyeluruh dari utara hingga ke selatan daerah penelitian PB4 pada level 2830 dan 2850 dikarenakan adanya daerah penelitian yang telah di *shotcrete*, *wetmuck*, dan di barikade pita kuning.
2. Pemetaan lapangan tidak dilakukan secara menyeluruh dari utara hingga ke selatan daerah penelitian PB5 pada level 2830 dan 2850 dikarenakan tidak adanya *progress development drift* terbaru pada daerah penelitian sehingga tim *Underground Geology GBC Development* tidak ada yang kesana.
3. Database yang digunakan untuk mendukung tugas akhir ini menggunakan data ter-update pada bulan maret 2023 hingga sebelumnya.



1.4. Lokasi Penelitian dan Kesampaian daerah

Secara Administratif daerah penelitian termasuk dalam wilayah Distrik Tembagapura, Kecamatan Mimika, Provinsi Papua. Secara geografis daerah ini terletak pada Pegunungan Graberg.

Lokasi yang menjadi objek penelitian yaitu tambang bawah permukaan *Grasberg Block Cave* (GBC) yang termasuk ke dalam wilayah operasi PT Freeport Indonesia. Daerah penelitian dapat dijangkau melalui jalan darat yaitu menggunakan bis lapis baja kurang lebih 45 menit yang berangkat dari halte bus di *shopping family mill* 68 atau halte bus di depan gereja sion tembagapura kemudian menuju *Ridge Camp Bus Terminal* lalu dilanjutkan berjalan kaki menuju *Office Building 3* (OB3) kurang lebih 5 menit, kemudian dilanjutkan menggunakan *Light Vehicle* (LV) dari *Office Building 3* (OB3) selama kurang lebih 40 menit menuju daerah penelitian. Pengamatan dan pengambilan data penelitian dilakukan pada terowongan *production block 4* (PB4) dan *production block 5* (PB5) tambang bawah *Grasberg Block Cave* (GBC).

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian berdasarkan maksud dan tujuan penelitian yang telah diuraikan diatas adalah

1. Keilmuan
 - Menambah referensi terkait sistem penambangan bawah tanah bagi *geologist*.
 - Mendapatkan gambaran tentang kondisi geologi yang berkembang di PT. Freeport Indonesia.
2. Perusahaan
 - Memberikan gambaran untuk menganalisis kembali karakterisasi *material type* pada area PB4 dan PB5 *Grasberg Block Cave* (GBC) baik pada level 2850 dan 2830 serta *problematic ore* yang berkembang agar *throughput* tidak menurun.
 - Membantu perusahaan dalam melakukan kegiatan pendidikan terhadap calon *geologist* Indonesia.



3. Institusi

- Menambah koleksi perpustakaan Universitas Hasanuddin, khususnya Program Studi Teknik Geologi.
- Menjalin kerjasama antara universitas dengan perusahaan.
- Sebagai upaya media promosi calon lulusan sarjana dengan penelitian yang dilakukan di perusahaan.

4. Penulis

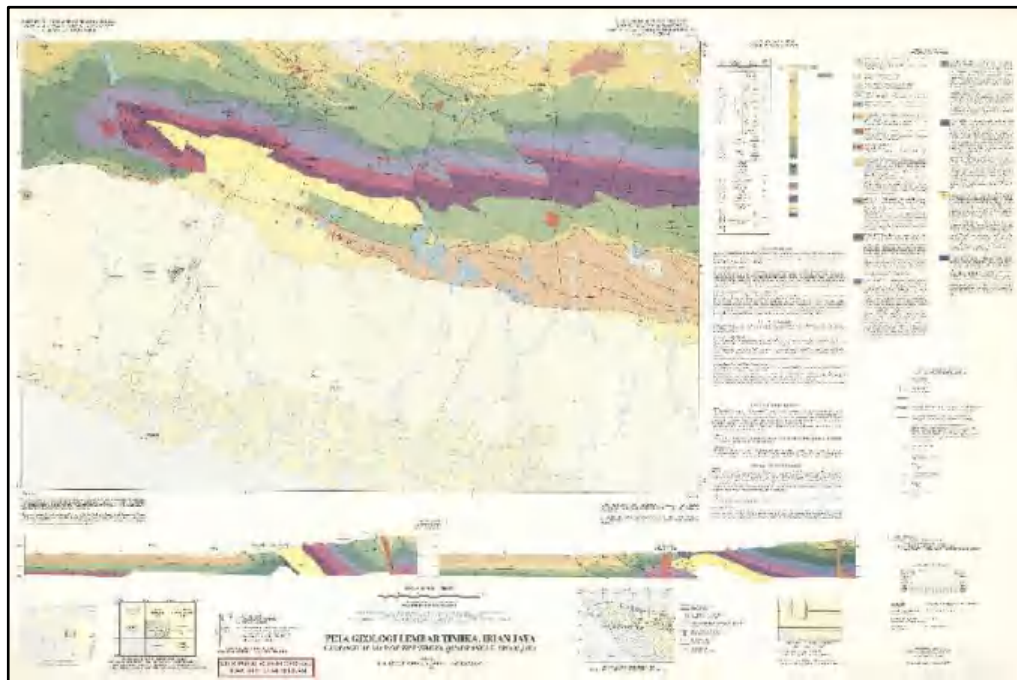
- Dapat menyelesaikan tugas akhir atau skripsi untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Geologi.
- Dapat mengetahui dan memahami cara melakukan karakterisasi *material type* dan jenis bijih yang bermasalah (*problematic ore*) berdasarkan faktor-faktor pembentuknya.
- Dapat mengaplikasikan ilmu pada bangku kuliah ke dalam dunia kerja, khususnya dalam bidang mineral dan energi.
- Menjadi media pembelajaran mengenai teknik pemetaan bawah permukaan dan persiapan menjadi *geologist/geoscience* dalam sistem penambangan bawah tanah.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geologi Regional

Secara regional Wilayah kerja PTFI didasarkan berdasarkan pada hasil peneliti terdahulu oleh E. Rusmana, K. Parris, U. Sukanta dan H. Samodra, (1995) daerah penelitian termasuk dalam Peta Geologi Lembar Timika skala 1 : 250.000. Berada pada zona subduksi antara Lempeng Australia yang bergerak ke utara dan Lempeng Indopasifik yang bergerak ke arah barat daya. Pada zona subduksi ini terjadi intrusi magma yang menembus lapisan batuan sedimen yang terbentuk terlebih dahulu. Adanya intrusi tersebut memungkinkan terjadinya proses mineralisasi yang kompleks sehingga menghasilkan zona yang kaya mineral.



Gambar 1 Peta Geologi Regional Lembar Timika Dengan Skala 1:250.000.

2.1.1. Geomorfologi Regional

Secara garis besar topografi dan morfologi pada daerah Kontak Karya PT Freeport Indonesia sangat bervariasi. Pada daerah pelabuhan, pantai dan rawa hutan bakau (*mangrove*) yang cukup luas. Makin ke atas, kondisi topografi jal dan dominasi hutan bakau berkurang dan berganti menjadi rawa nipa . Pada jarak 40 km dari garis pantai, daerah didominasi dengan hutan yang



lebat dengan pepohonan yang homogen dengan bentuk topografi umum jurang yang terjal.

Pada daerah Tembagapura dengan ketinggian sekitar 2.000 m dpl, terdapat banyak jurang dan dinding batuan yang terjal, air terjun dan lembahlembah yang curam. Pada sekitar daerah penambangan, pada ketinggian 2.800 – 4.000 m dpl hampir tidak ditemukan adanya pepohonan, dimana daratan hanya didominasi oleh tanaman perdu, rumput liar dan lumut.

Hal ini diakibatkan karena ketinggian yang cukup tinggi, sehingga hanya beberapa tanaman yang dapat tumbuh. Pada beberapa daerah, kadang diselimuti oleh salju yang menutupi daratan. Pada daerah ini, terdapat pula pegunungan yang membentuk lipatan yang curam dan terjal yang disertai oleh patahan-patahan. Berdasarkan topografi, daerah Kontrak Karya PT Freeport Indonesia dapat dibagi menjadi dua, yaitu *lowland* dan *highland* (Mahler, 2008)

a. Daerah Dataran Rendah (*lowland*)

Daerah dataran rendah (*lowland*), merupakan dataran rendah yang mencakup lokasi pelabuhan Amamapare (*portsite*), Timika, perumahan karyawan dan kantor administrasi di Kuala Kencana serta beberapa lokasi pendukung lainnya. Daerah *Lowland* merupakan topografi yang relatif datar dengan elevasi antara 10 mdpl sampai 2.000 mdpl.

b. Daerah Dataran Tinggi (*Highland*)

Daerah dataran tinggi (*Highland*), merupakan dataran tinggi yang mencakup perumahan karyawan mulai dari *mile 66 (Hidden Valley)*, *mile 68* (Tembagapura), *mile 72 (Ridge Camp)*, *mile 74 (mill site)* hingga ke lokasi tambang bawah tanah dan tambang terbuka *Grasberg*. Daerah *Highland* merupakan rangkaian dari pegunungan Jayawijaya merupakan topografi yang berbukit dengan ketinggian 2.000 mdpl sampai 4.200 mdpl. Lokasi penambangan berada pada ketinggian sekitar 2.800 mdpl sampai 4.000 mdpl.



Kelompok *New Guinea Limestone*, yang terdiri dari Formasi Waripi, Formasi Faumai, Formasi Sirga, dan Formasi Kais. Diatas Kelompok Batugamping New Guinea diendapkan Formasi Buru. Setelah Formasi Buru, diendapkan batuan vulkanik Miosen Akhir sampai Pliosen, Konglomerat Kuarter, dan terakhir Sedimen Glasial Kuarter.

a. Kelompok Kembelangan

Pigram dan Panggabean (1982) mengelompokkan formasi-formasi Kembelangan menjadi empat formasi, yaitu Formasi Kopai, Formasi Woniwogi, Formasi Piniya, dan Formasi Ekmai. Secara umum formasi ini memiliki warna abu-abu, batupasir dan batulanau argilaceous, glaukonitik, karbonatan, mikaan dan piritik, batulanau hitam sampai batugamping hitam, batupasir kuarsa dan ortokuarsit piritik.

b. Formasi Kopai

Formasi Kopai memiliki ketebalan 1400 ± 300 meter. Formasi ini terdiri dari lapisan batupasir berukuran butir pasir halus sampai pasir sedang, dan memiliki struktur silang siur. Lingkungan pengendapan formasi ini memiliki variasi. Berdasarkan kontak yang gradasi dengan formasi dibawahnya, Formasi Tipuma, dan batupasir lentikuler dan silang siur dibagian bawah formasi, lingkungan pengendapan Formasi Kopai diinterpretasikan sebagai lingkungan transisi fluvial-batial (*transgresif*), sedangkan bagian atas formasi terdiri dari batugamping *packstone* dan *grainstone*, diinterpretasikan sebagai lingkungan *shelf* dengan energi menengah sampai tinggi (*regresif*).

c. Formasi Wonowogi

Formasi Woniwogi memiliki ketebalan 1000 ± 200 meter. Formasi ini memiliki ciri-ciri yaitu sortasi buruk, ukuran butir kasar hingga kerikil dengan matriks berukuran sangat halus berupa kuarsa, mineral opak, dan klorit. Alterasi yang terjadi berupa alterasi silisifikasi dan mineralisasi sulfida. Pada umumnya formasi ini memiliki struktur masif, tetapi dibeberapa singkapan terlihat struktur perlapisan dan silang siur dengan bioturbasi yang intens. Berdasarkan mikro fosil

- fosil yang ditemukan, formasi ini memiliki umur *Cretaceous* akhir.
- Woniwogi diendapkan pada lingkungan lereng dan paparan laut yang
- pasir. Batupasir dengan sortasi buruk diinterpretasikan sebagai hasil arus



debris submarine pada lingkungan lereng benua. Batupasir dengan sortasi baik dan bioturbasi sedikit adalah paparan dengan energi pengendapan sedang sampai tinggi dan kaya akan pasir. Lapisan batupasir tipis dengan bioturbasi intens diendapkan pada energi pengendapan yang rendah.

d. Formasi Piniya

Formasi Piniya memiliki ketebalan 1550 ± 300 meter. Formasi ini terdiri dari batulanau-batulempung dengan struktur laminasi hingga masif, sortasi baik, perulangan batupasir halus dengan unit batuan yang lebih halus. Perulangan lapisan batupasir dengan batulanau-batulempung diinterpretasikan sebagai daerah lepas pantai, terbentuk oleh badai. Sekuen batulanau - batulempung masif diinterpretasikan sebagai lingkungan batial atau endapan turbidit.

e. Formasi Ekmai

Formasi Ekmai memiliki ketebalan 650 ± 100 meter. 500 meter dari bagian bawah tersusun dari batupasir arenit kuarsa dan 90 meter dari bagian atas terdiri dari batulempung dan batugamping, dan 20 meter teratas merupakan sekuen batulanau karbonatan. Lingkungan pengendapan bagian bawah formasi (550 meter) diinterpretasikan sebagai sekuen zona laut pantai atau paparan dekat pantai. Kehadiran foraminifera pelagik pada 90 meter dari bagian atas menunjukkan lingkungan batial, paparan luar, sedangkan 20 meter dari bagian atas ditemukan ooid neritik, bryozoa, kuarsa pasir, batugamping kasar menunjukkan lingkungan laut dangkal, dengan energi tinggi.

f. Kelompok Batugamping *New Guinea*

Menurut Ufford (1996), kelompok Batugamping *New Guinea* dibagi menjadi 4 formasi, yaitu Formasi Waripi, Formasi Faumai, Formasi Sirga, dan Formasi Kais.

g. Formasi Waripi

Formasi Waripi memiliki ketebalan 280-400 meter. Formasi ini terdiri dari batu dolomit, batugamping, batupasir arenit kuarsa dan 2 meter lapisan anhidrit. Lingkungan pengendapan formasi ini diinterpretasikan berada pada zona silisiklastik Mesozoik dengan endapan karbonat Kenozoik pada an laut dangkal, air yang hangat dengan gelombang yang tinggi. Formasi Formasi Faumai memiliki ketebalan 200-300 meter yang diendapkan



dias formasi Waripi. Formasi ini berumur Eosen dan terdiri dari foraminifera, batugamping packstone peloidal dengan dolomit dan kuarsa yang sedikit. Lingkungan pengendapan diinterpretasikan berada pada lingkungan laut dangkal dengan gelombang rendah sampai sedang.

h. Formasi Sirga

Formasi Sirga memiliki ketebalan 40 meter. Formasi ini memiliki umur Oligosen-pertengahan Miosen dan diendapkan tidak selaras diatas formasi Faumai. Batupasir arenit kuarsa dengan kandungan arenit kuarsa foraminifera yang semakin keatas semakin banyak menunjukkan lingkungan pengendapan berada pada lingkungan transgresif bercampur dengan endapan fluvial dan laut dangkal.

i. Formasi Kais

Formasi Kais memiliki ketebalan 1100-1300 meter, yang terdiri dari batugamping packstone alga merah dan foraminifera. Formasi ini diendapkan secara gradasional diatas formasi Sirga. Bagian atas mengandung lapisan batubara. Umur formasi ini adalah Oligosen sampai pertengahan Miosen. Lingkungan pengendapan Formasi Kais berada pada lingkungan laut dangkal, energi rendah sampai sedang dengan kandungan koral yang tinggi pada puncaknya.

j. Formasi Buru

Formasi Buru memiliki ketebalan 6000 meter (Visser dan Hermes, 1962 dalam Ufford, 1996). Formasi ini terdiri dari batugamping berukuran butir pasir halus, lapisan konglomerat yang jarang, klastika karbonan dan karbonatan, dan batulempung masif dengan fosil pelesipoda dan gastropoda. Formasi Buru diperkirakan sebagai endapan yang terbentuk di lingkungan laut dan dekat dengan pantai yang ditimpa oleh sedimen darat (Pigram dan Panggabean, 1983 dalam Ufford, 1996).

k. Vulkanik Miosen Akhir sampai Pliosen

Formasi ini terdiri dari tuff mafik, lahar, dan piroklastik (Parris, 1994 dalam Ufford, 1996). Analisis umur K-Ar pada vulkanik menunjukkan umur 7,0 - 5,2 juta tahun yang lalu.



Batuan vulkanik merupakan bagian dari Kompleks Batuan Beku (MacDonald dan Arnold, 1994 dalam Ufford, 1996). Luas area vulkanik

Grasberg adalah $<4 \text{ km}^2$ dan ketebalan belum diketahui, tetapi kemungkinan memiliki ketebalan ratusan meter.

1. Sedimen Konglomerat dan Glasial Kuarter

Pegunungan Tengah Papua memiliki jurang dibagian selatan, dan kehadiran jurang ini menghasilkan sedimen konglomerat, sedangkan sedimen glasial kuarter terbentuk dari proses glasiasi terakhir pada puncak Pegunungan Tengah Papua (4000 meter diatas permukaan laut).

2.1.3. Tektonik Regional

Pada umumnya deformasi Pegunungan Tengah Papua terjadi sekitar 12 juta sampai 4 juta tahun yang lalu. Menurut Ufford (1996), deformasi tersebut dibagi menjadi dua tahap, yaitu:

a. Tahap 1 (12 – 4 juta tahun yang lalu)

Sebelum 12 juta tahun yang lalu, batuan terendapkan pada batas lempeng pasif yang stabil. Sejak 12 juta tahun yang lalu, lipatan dengan skala kilometer mulai terbentuk pada bagian tepi benua Australia bagian utara. Bagian tepi tersebut menunjam di zona penunjaman lempeng Pasifik dengan arah kemiringan timur laut. Kebanyakan gerakan yang terhitung memiliki trend 65° . Sesar yang terbentuk adalah sesar Wanagon, sesar *Ertsberg* II, dan sesar *Meren Valley*.

Setelah penunjaman, pra-kolisi mulai terjadi dengan naiknya permukaan pada batas lempeng benua Australia bagian utara. Sedimen yang paling muda, Formasi Buru, mulai terangkat. Pada 8 juta tahun yang lalu, kolisi mulai terjadi, dan pengangkatan yang terbesar terjadi pada 6 juta tahun yang lalu. Peristiwa ini mengakibatkan intrusi magma dan vulkanisme terkumpul disepanjang dasar pegunungan, sehingga magma mafik yang berasal dari mantel bagian atas akan mendorong bagian dasar kerak, dan bagian bawah kerak akan bercampur dengan batuan samping yang leleh.

b. Tahap 2 (4-2 tahun yang lalu)

Tahap kedua merupakan pembentukan deformasi yang relatif kecil, hanya hingga satu kilometer. Arah sesar geser mengiri sejajar dengan arah lapisan esar-sesar geser utama seperti sesar Wanagon, sesar *Ertsberg* I dan II, dan *ren Valley* memiliki breksi, *dike*, dan mineralisasi yang menunjukkan



bahwa sesar geser ini merupakan faktor signifikan dalam terbentuknya delaminasi atau celah intrusi dan permeabilitas untuk mengalirnya fluida hidrotermal.

Pada 2 juta tahun yang lalu, proses magmatik berhenti karena delaminasi berhenti. Bagian astenosfer mendingin dan berubah menjadi mantel litosfer. Pergerakan mendatar diperkirakan memiliki total sejauh 10 kilometer.

2.2. Alterasi dan Mineralisasi

Alterasi atau ubahan adalah suatu proses yang menyebabkan adanya pelepasan dan pengikatan salah satu atau beberapa unsur kimia dari mineral pembentuk batuan yang disebabkan oleh adanya interaksi antara fluida panas magma, air magmatik ataupun air meteorik dengan batuan yang diterobosnya pada tekanan dan temperatur tertentu, baik itu lewat patahan, pori-pori batuan, ketidak selarasan dan lain sebagainya. Dimana salah satu atau beberapa mineral akan berubah menjadi mineral lainya dengan rumus molekul yang lebih stabil pada tekanan dan temperatur tersebut. Sedangkan mineralisasi adalah proses terkonsentrasinya mineral yang dapat terbentuk akibat adanya proses alterasi.

Mineralisasi adalah suatu proses introduksi atau masuknya mineral ke dalam batuan yang kemudian membentuk mineral-mineral yang memiliki sifat ekonomis seperti mineral bijih dan mineral penyerta. Endapan mineral adalah akumulasi atau konsentrasi dari satu atau beberapa material yang berguna, baik berupa logam maupun non logam, yang terdapat di dalam kerak bumi bagian luar (Bateman, 1981).

Hal-hal pokok yang mempengaruhi pembentukan mineral hasil dari proses bergeraknya larutan magmatik pembawa mineral dan adanya celah batuan sebagai jalan bagi lewatnya larutan hidrotermal. Selain itu, faktor lain adalah adanya tempat bagi pengendapan mineral, terjadinya reaksi kimia yang dapat menyebabkan terbentuknya pengendapan mineral, dan konsentrasi larutan yang cukup tinggi bagi terendapkannya kandungan mineral.



Alterasi Hidrothermal

Alterasi hidrothermal adalah perubahan komposisi mineral dari suatu akibat adanya interaksi antara larutan hidrothermal dengan batuan tersebut.

Proses alterasi akan menyebabkan berubahnya mineral primer menjadi mineral sekunder yang kemudian disebut dengan mineral yang teralterasi (*alteration minerals*). Alterasi hidrotermal merupakan proses yang kompleks karena terjadi perubahan secara mineralogi, kimia dan tekstur oleh akibat adanya interaksi larutan hidrotermal dengan batuan sampling (*wall rock*) yang dilaluinya pada kondisi fisika-kimia tertentu (Pirajno, 1992).

Beberapa faktor yang berpengaruh pada proses alterasi hidrotermal adalah suhu, kimia fluida (pH), komposisi batuan sampling, durasi aktivitas hidrotermal dan permeabilitas. Namun, faktor kimia fluida (pH) dan suhu merupakan faktor yang paling berpengaruh (Corbett dan Leach, 1996).

a. Suhu

Suhu merupakan hal yang paling penting dalam proses alterasi karena hampir semua reaksi kimia yang terjadi diakibatkan oleh adanya kenaikan suhu.

b. Permeabilitas

Permeabilitas dari suatu batuan akan menentukan intensitas pengaruh larutan hidrotermal terhadap batuan dan kecepatan presipitasi mineral-mineral baru. Batuan yang memiliki permeabilitas kecil akan menyebabkan tingkat pengaruh alterasi yang tidak signifikan.

c. Komposisi awal dari batuan

Komposisi kimia awal dari batuan yang terkena larutan hidrotermal akan menentukan komponen-komponen yang akan terbentuk akibat proses alterasi.

d. Komposisi Fluida

pH dan komposisi fluida mempunyai pengaruh yang sangat besar dalam menentukan tingkat kecepatan dan jenis mineral-mineral hidrotermal yang terbentuk.

Proses alterasi hidrotermal akan menghasilkan kumpulan mineral tertentu yang dikenal sebagai himpunan mineral atau *mineral assemblage* (Guilbert & Park, 1986). Hal ini menyebabkan kehadiran himpunan mineral tertentu dalam suatu ubahan batuan akan mencerminkan komposisi pH larutan dan suhu fluida tipe tertentu.



2.2.1.1. Zona Alterasi

Suatu zona yang memperlihatkan adanya penyebaran himpunan mineral - mineral tertentu yang terbentuk dari hasil proses alterasi disebut sebagai zona alterasi (*alteration zone*). Penggunaan istilah zona dan tipe terkadang membingungkan untuk pemula, namun hendaknya hal ini tidak untuk terlalu dipermasalahkan. (Lowell & Guilbert, 1970; Thomson & Thomson, 1996).

Umumnya pengelompokkan tersebut didasarkan pada keberadaan himpunan mineral-mineral tertentu yang dijumpai pada suatu endapan. Adapun macam macam macam alterasi yang umum dijumpai pada endapan hidrotermal yaitu antara lain :

a. Potasik

Jenis alterasi ini dicirikan oleh kehadiran mineral ubahan berupa biotit sekunder, k-feldspar, kuarsa, serisit, dan magnetit. Biotit sekunder hadir akibat reaksi antara mineral-mineral mafik terutama hornblende dengan larutan hidrotermal yang kemudian menghasilkan biotit, feldspar, maupun piroksin. Selain itu, tipe alterasi ini dicirikan oleh melimpahnya himpunan muskovit – biotit - alkali felspar - magnetit. Anhidrit sering hadir sebagai asesori, serta sejumlah kecil albit dan titanit (*sphene*) atau rutil.

Alterasi potasik terbentuk pada daerah yang dekat dengan batuan beku intrusif porfiri, fluida yang panas ($>300^{\circ}\text{C}$), salinitas tinggi, dan dengan karakter magmatik yang kuat. Alterasi ini diakibatkan oleh penambahan unsur potasium (K) pada proses metasomatis dan disertai dengan banyak atau sedikitnya unsur kalsium dan sodium di dalam batuan yang kaya akan mineral aluminosilikat. Mineralisasi yang umumnya dijumpai pada zona ubahan potasik ini terbentuk menyebar tempat mineral tersebut merupakan mineral-mineral sulfida yang terdiri atas pirit maupun kalkopirit dengan rasio yang relatif sama.

b. Filik

Tipe alterasi ini biasanya terletak pada bagian luar dari zona potasik terutama pada endapan tembaga porfiri. Batas zona alterasi ini berbentuk circular mengelilingi zona potasik yang berkembang pada intrusi pada endapan porfiri. Zona ini dicirikan oleh kumpulan mineral serisit (mika halus) dan bagai mineral utama dengan mineral pirit yang melimpah serta sejumlah



anhidrit. Mineral bijih yang dijumpai berupa kalkopirit, tembaga dan *native gold* (emas). Mineral serisit terbentuk pada proses hidrogen metasomatis yang merupakan dasar dari alterasi serisit yang menyebabkan mineral feldspar yang stabil menjadi rusak dan teralterasi menjadi serisit dengan penambahan unsur H^+ , menjadi mineral filosilikat atau kuarsa. Zona ini tersusun oleh himpunan mineral kuarsa-serisit-pirit, dengan kehadiran pirit yang sangat melimpah yang umumnya tidak mengandung mineral-mineral lempung atau alkali feldspar. Zona ini terbentuk akibat influks air yang memiliki suhu yang lebih rendah dan fluida asam-netral, salinitas beragam, pada zona permeabel, dan pada batas dengan urat.

c. Argilik

Zona ini terdiri atas mineral lempung argilik seperti kaolinit dan montmorilonit. Kehadiran zona ini menandakan semakin intensnya kehadiran influks air meteorik yang memiliki suhu dan nilai pH yang lebih rendah. Himpunan mineral pada tipe argilik terbentuk pada temperatur 100° – $300^{\circ}C$ (Pirajno, 1992), fluida asam-netral, dan salinitas rendah.

d. Argilik lanjut (*advanced argilic*)

Pada sistem epitermal sulfidasi tinggi (fluida kaya asam sulfat), ditambahkan istilah *advanced argilic* yang dicirikan oleh kehadiran himpunan mineral pirofilit-diaspor-andalusit-kuarsa-turmalin-enargit-luzonit (untuk suhu tinggi, 250° – $350^{\circ}C$), atau himpunan mineral kaolinit – alunite – kalsedon – kuarsa – pirit (untuk suhu rendah $<180^{\circ}$).

e. Propilitik

Dicirikan oleh kehadiran klorit disertai dengan beberapa mineral epidot, illit/serisit, kalsit, albit, dan anhidrit. Terbentuk pada temperatur 200° – $300^{\circ}C$ pada pH mendekati netral, dengan salinitas beragam, umumnya pada daerah yang mempunyai permeabilitas rendah.

f. Propilitik dalam (inner propilitik)

Tipe alterasi ini dijumpai pada sistem epitermal sulfidasi rendah (fluida kaya klorida, pH mendekati netral), umumnya menunjukkan zona alterasi seperti am porfiri, tetapi menambahkan istilah *inner propylitic* untuk zona pada suhu tinggi ($>300^{\circ}C$) yang dicirikan oleh kehadiran epidot, klorit, dan illit.



g. Skarn

Alterasi ini terbentuk akibat kontak antara batuan sumber dengan batuan karbonat, zona ini sangat dipengaruhi oleh komposisi batuan yang kaya akan kandungan mineral karbonat. Pada kondisi yang kurang akan air, zona ini dicirikan oleh pembentukan mineral garnet, klinopiroksin dan wollastonit serta mineral magnetit dalam jumlah yang cukup besar, sedangkan pada kondisi yang kaya akan air, zona ini dicirikan oleh mineral klorit, tremolit – aktinolit dan kalsit dan larutan hidrotermal. Garnet – piroksen - karbonat adalah kumpulan yang paling umum dijumpai pada batuan induk karbonat yang orisinil (Taylor, 1996, dalam Sutarto, 2002). Amfibol umumnya hadir pada skarn sebagai mineral tahap akhir yang menutupi mineral-mineral tahap awal. Aktinolit (CaFe) dan tremolit (CaMg) adalah mineral amfibol yang paling umum hadir pada skarn. Jenis piroksen yang sering hadir adalah diopsid (CaMg) dan hedenbergit (CaFe).

Tabel 1 Tipe-tipe alterasi berdasarkan himpunan mineral

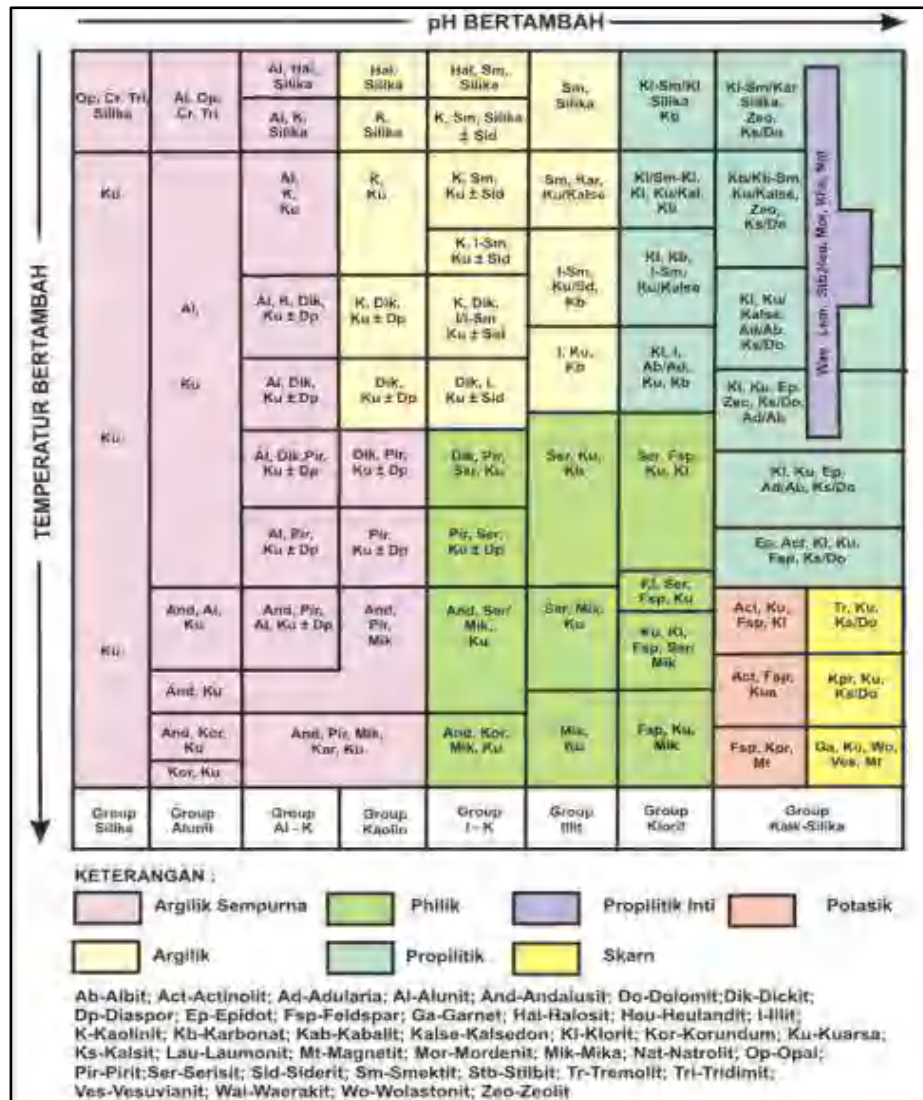
Tipe	Mineral Kunci	Mineral Asesori	Keterangan
Argilik	Smektit, monmorilonit illite-smektit, kaolinit	Pirit, klorit, kalsit, kuarsa	Suhu 100–300°C, salinitas rendah, pH asam-netral
Propilitik	Klorit, epidot, karbonat	Albit, kuarsa, kalsit, pirit, lempung, oksida besi	Suhu 200–300°C, salinitas bervariasi, pH mendekati netral, permeabilitas rendah
Potasik	Adularia, biotit, kuarsa	Klorit, epidot, pirit, illit- serisit	Suhu >300°C, salinitas tinggi, dekat dengan intrusi
Filik	Kuarsa, serisit, pirit	Anhidrit, pirit, kalsit, rutil	Suhu 230–400°, salinitas beragam, pH asam- netral, zona tembus air pada batas urat
Serisitik	Serisit (illit), kuarsa, muskovit	Pirit, illit-serisit	
Silisifikasi	Kuarsa	Pirit, illit-serisit, adularia	
Argilik lanjut (suhu rendah)	Kaolinit, alunite	Kalsedon, kristobalit, kuarsa, pirit	Suhu 180°C, pH asam
Argilik lanjut (suhu tinggi)	Pirofilit, diaspor, andalusit	Kuarsa, turmalin, energit, luzonit	Suhu 250–350°C, pH asam

Guilbert & Park (1986)

Corbett dan Leach (1996) mengemukakan bahwa komposisi batuan sampling mempunyai peran yang sangat penting dalam mengontrol mineralogi alterasi. Mineralogi skarn yang dicirikan dengan kehadiran mineral-mineral akan terbentuk pada batuan karbonatan, sementara kehadiran kumpulan adularia dan K-felspar menunjukkan lingkungan batuan yang kaya akan natrium (Na) dan kalium (K). Paragonit (Na-mika) akan hadir pada proses alterasi pada



batuan yang kaya akan mineral dengan kandungan sodium (Na) seperti albit. Kehadiran muskovit menegaskan proses alterasi yang terjadi pada batuan kaya akan unsur potasik (K). Jenis alterasi juga mempunyai hubungan yang erat dengan temperatur dan pH dari batuan dan larutan hidrotermal.



Gambar 4 Diagram hubungan antara suhu-pH dan jenis alterasi serta himpunan mineral-mineral pencirinya. (Corbett & Leach, 1996)

2.2.2. Endapan Hidrothermal

Endapan hidrotermal merupakan jenis endapan bijih yang sangat penting karena endapan ini merupakan salah satu sumber utama dari bijih emas dan tembaga serta logam ekonomis lainnya. Ada beberapa hal penting yang berperan dalam pembentukan endapan bijih hidrotermal, yaitu: sumber air (*water source*), asal-usul

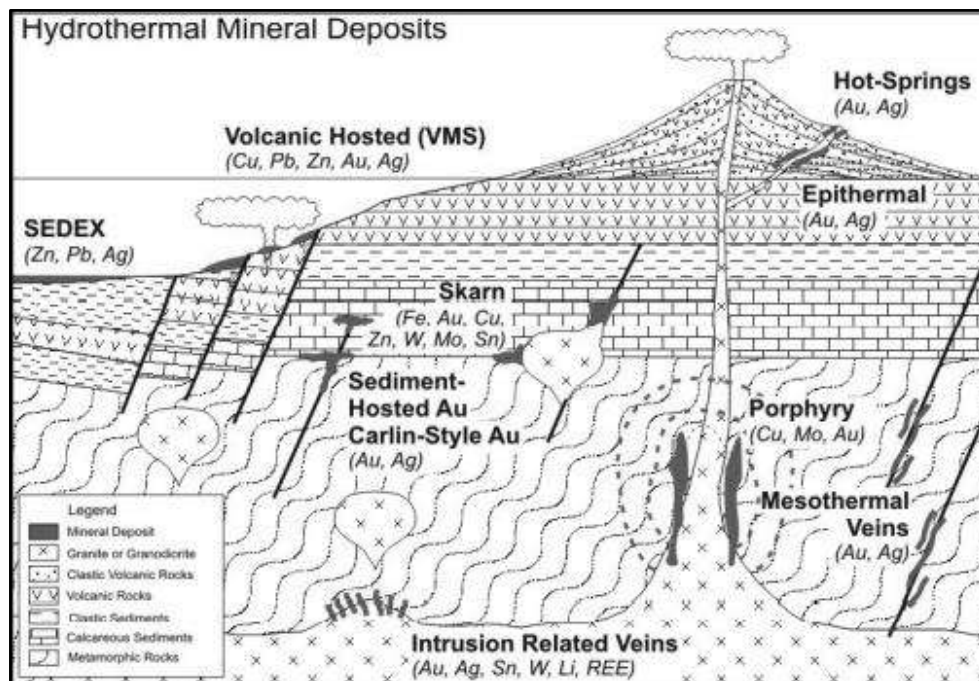


komponen bijih, proses transportasi dari bijih, permeabilitas, penyebab, dan pengendapan bijih.

Sumber dari logam pada larutan hidrotermal yaitu :

1. batuan dan material sedimen yang dilalui oleh larutan hidrotermal.
2. berasal dari magma itu sendiri.
3. kombinasi di antara keduanya seperti pada *geothermal system*.

Larutan hidrotermal erat kaitannya dengan aktivitas gunung api, baik aktif maupun yang baru saja aktif (*recently active*) maupun dengan tubuh intrusi. Larutan hidrotermal juga sering dijumpai berasosiasi dengan sebuah sistem panas bumi (*geothermal system*).



Gambar 5 Skematik diagram dari jenis-jenis endapan hidrotermal.

Menurut Pirajno (2009), secara umum proses pembentukan *ore* atau mineralisasi bijih pada endapan jenis hidrotermal dipengaruhi oleh beberapa faktor pengontrol, meliputi:

1. larutan hidrotermal yang berfungsi sebagai larutan pembawa mineral.
2. zona lemah yang berfungsi sebagai saluran untuk melewati larutan hidrotermal.

tersedianya ruang untuk pengendapan larutan hidrotermal.



4. terjadinya reaksi kimia dari batuan induk / *host rock* dengan larutan hidrotermal yang memungkinkan terjadinya pengendapan mineral bijih (*ore*).
5. adanya konsentrasi larutan yang cukup tinggi untuk mengendapkan mineral bijih (*ore*).

Endapan hidrotermal dicirikan dengan adanya endapan tipe urat atau *vein type deposit*, yang merupakan daerah tempat mineralisasi bijih terjadi dan membentuk tubuh yang diskordan (memotong tubuh batuan yang ada di sekelilingnya). Kebanyakan urat-urat terbentuk pada zona-zona patahan atau mengisi rongga-rongga pada batuan atau daerah rekahan. Banyak endapan yang bernilai ekonomis tinggi seperti emas, tembaga, perak, logam dasar (Pb – Zn - Cu) dan arsenik, merkuri dan mineral-mineral logam ekonomis lainnya yang berasosiasi dengan mineral-mineral pengotor (*gangue mineral*), seperti kuarsa dan kalsit pada batuan sampingnya (*country rocks*) dalam bentuk struktur urat. Kehadiran urat-urat ini merupakan salah satu penciri utama dari jenis endapan hidrotermal.

Berdasarkan tipe dan model endapannya, endapan hidrotermal dapat dibagi menjadi tipe endapan antara lain:

1. endapan epitermal (*epithermal deposit*)
2. endapan tembaga porfiri (*porphyry copper deposit*)
3. endapan skarn (*skarn deposit*)
4. endapan sulfida masif vulkanik (*volcanogenic massif sulfide deposit*)
5. endapan *sedimentary exhalative* atau SEDEX (*sedimentary exhalative deposit*)

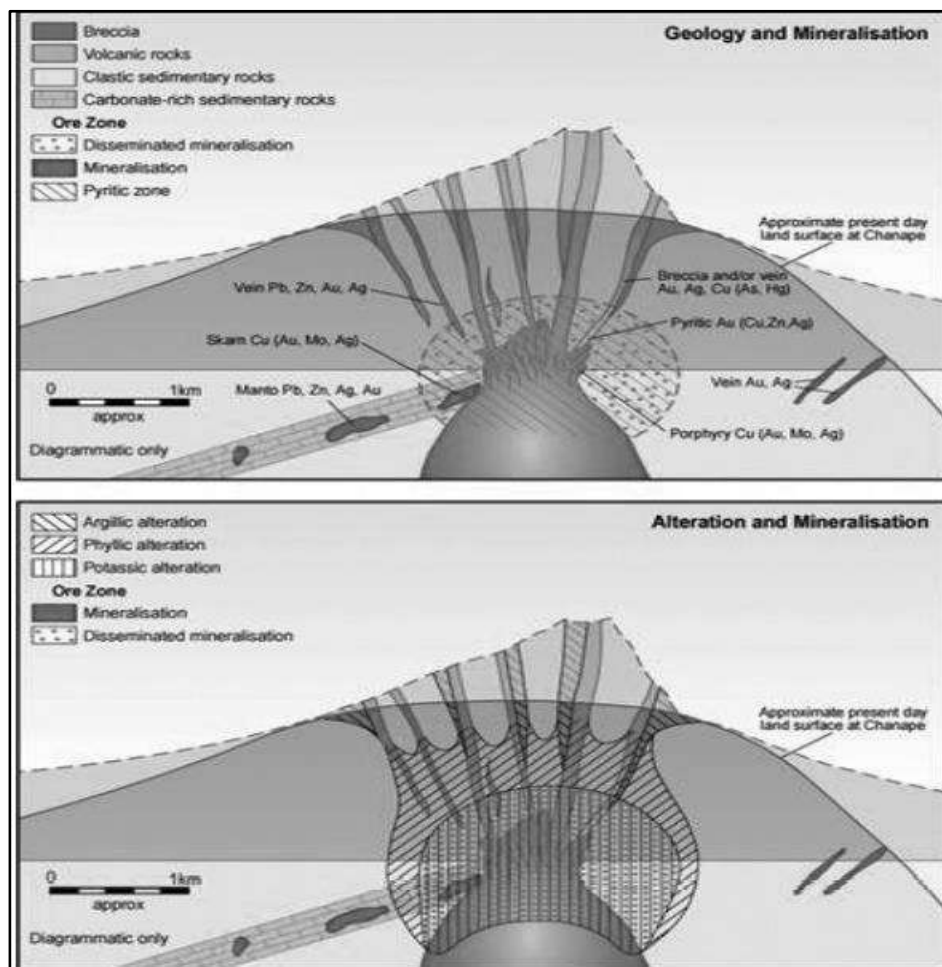
2.2.3. Endapan Porfiri

Endapan porfiri adalah jenis endapan hidrotermal dengan karakter penyebaran pola bijih yang melebar luas dan mengandung konsentrasi bijih yang rendah yang dijumpai pada batuan beku dengan tekstur porfiritik dengan komposisi asam sampai dengan menengah (Sillitoe, 2010). Terbentuk akibat asosiasi antara hidrotermal dengan aktivitas *intrusive igneous rock* dimana terdapat mineral sulfida dan oksida yang terbentuk dari larutan hidrotermal pada



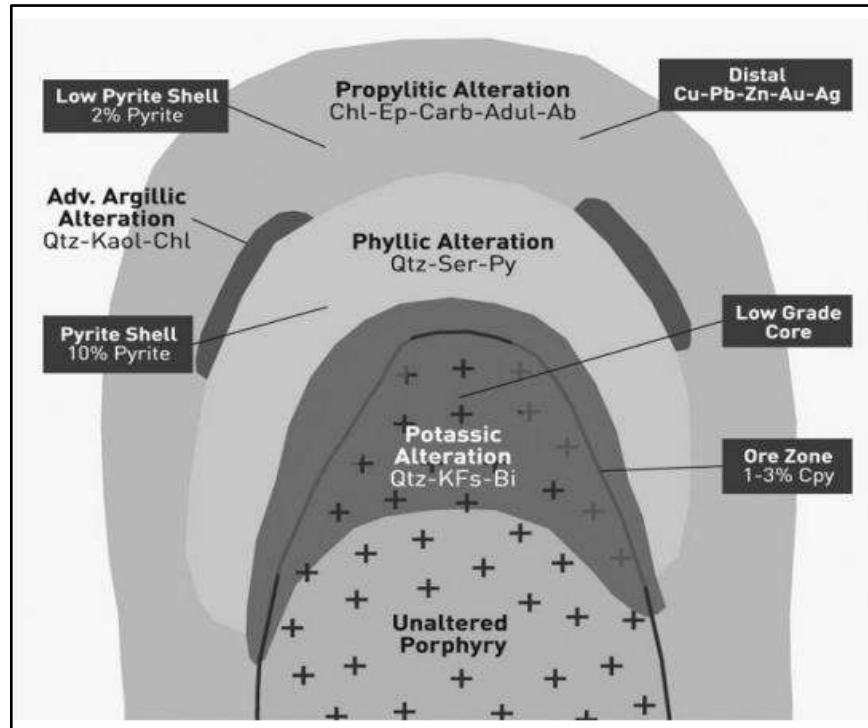
suhu yang tinggi. (*intrusive* umumnya bertekstur porfiritik dan sering berasosiasi dengan batuan vulkanik yang sejenis).

Deposit ini sumber utamanya ialah Cu dan Mo di dunia dan juga menyumbangkan cadangan Au, Ag, W, dan Sn. 75% copper dan merupakan sumber utama dari molybdenum (50%), emas (20%) dan perak (Sillitoe, 2010). Mineral bijih primer secara spasial dan genetiknya berhubungan dengan intrusi batuan asam sampai dengan intermediate yang bertekstur porfiritik. Tubuh bijih pada umumnya dikontrol oleh struktur geologi dan mempunyai bentuk konsentrik (*concentric*).



Gambar 6 Penampang skematik sebuah endapan tembaga porfiri.





Gambar 7 Skema tipe endapan dan model konseptual penampang endapan tembaga porfiri (dimodifikasi dari Sillitoe, 2010).

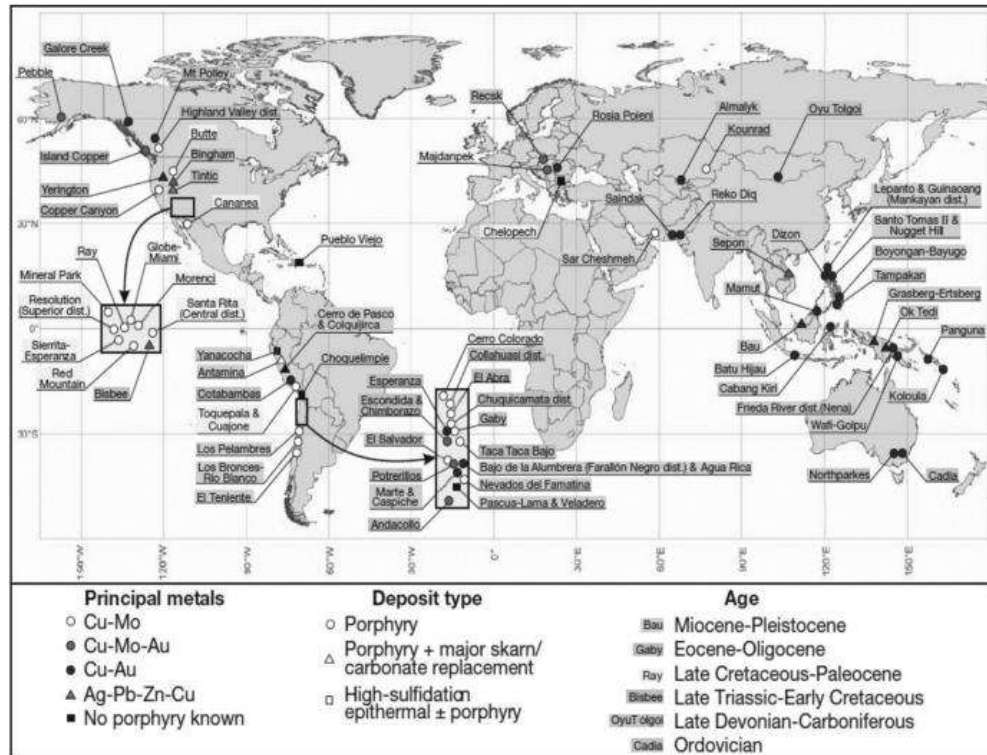
2.2.3.1. Penyebaran

Penyebaran endapan ini sangat erat kaitannya dengan sabuk pegunungan (*orogenic belt*) dengan batas lempeng konvergen (*convergen plate boundary*) baik pada busur kepulauan maupun busur kontinen. Ditemukan dari yang berumur Paleozoik sampai dengan yang berumur Tersier (Seedorf, dkk., 2005).

Terbentuk pada lingkungan tektonik busur kepulauan (*island arc*) atau busur kontinen (*continental arc*) berasosiasi dengan zona subduksi. Komposisi ialah *tonalite* sampai dengan *monzonite* dengan afinitas magma yang dominan yang dijumpai pada hampir 25 deposit yang berskala besar yaitu *calc-alkaline* (Cooke, dkk., 2005) dihasilkan oleh proses subduksi seperti halnya yang dijumpai di Sumbawa (Batu Hijau Deposit). Namun ada beberapa *deposit* yang dijumpai berasosiasi dengan *magma high-K calc-alkaline* seperti di Grasberg (Papua), *Bingham Canyon* dan *Kal'makyr* yang merupakan pengecualian.

Berdasarkan keterdapatannya porfiri deposit terbagi menjadi dua kelompok besar yaitu kelompok yang berhubungan dengan subduksi pada Amerika Selatan sampai utara dan kelompok yang berhubungan dengan subduksi Pasifik di bagian barat.





Gambar 8 Penyebaran endapan tembaga porfiri di dunia (Sillitoe, 2010).

2.2.3.2. Jenis Endapan Porfiri

Sistem endapan porfiri dibagi menjadi empat golongan utama berdasarkan mineral ore yang dihasilkan yaitu :

a. *Porphyry Cu*

Mineral-mineral bijih yang dijumpai pada jenis endapan ini, yaitu kalkopirit, bornit, kalkosit, covelit, kuprit, dan tenorit. Bijih dijumpai dalam bentuk *quartz - sulfide stockwork* dan juga *disseminated sulfide*. Di beberapa endapan dijumpai zona pengayaan sekunder (*zone of secondary enrichment*) pada bagian permukaan yang disebabkan oleh adanya pelarutan air tanah (*groundwater leaching*) dan pengendapan Cu di kedalaman yang rendah.

Beberapa endapan tembaga porfiri mengandung Au dan Mo yang ekonomis sehingga dikatakan sebagai endapan porphyry Cu - Au dan porphyry Cu - Mo. Biasanya endapan ini berasosiasi dengan batuan jenis I - type yang teroksidasi. Contoh endapan jenis ini yaitu Batu Hijau di Sumbawa dan Grasberg



b. *Porphyry Mo*

Molybdenum (Mo) porfiri sebuah endapan luas dengan endapan molybdenum low grade sebagai sumber utama dari bijih molybdenum. Endapan ini cenderung terbentuk pada batuan yang paling terdiferensiasi dari sebuah urutan intrusi dan hanya memiliki satu mineral bijih yaitu Mo yang ada mineral molibdenit.

Mineralisasi molibdenit umumnya dijumpai dalam bentuk urat-urat halus yang menyusun *stockwork* dengan alterasi serisit. Alterasi hidrotermal tingkat akhir biasa ditandai dengan kehadiran kaolinit dan urat kalsit seperti yang dijumpai di Endako porphyry molibdenum deposit di British Columbia, Canada.

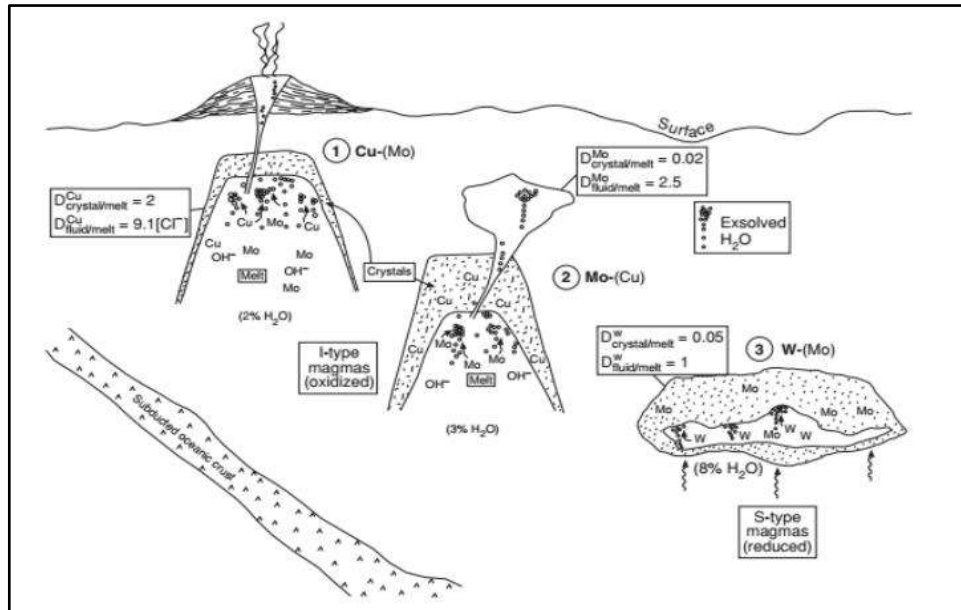
c. *Porphyry Sn*

Terbentuknya pada daerah kompleks subvulkanik yang mengandung *cassiterite* berbutir halus dengan tekstur *disseminated* dan *veinlet* serta *breccia* pada batuan porfiri yang kaya akan kuarsa. Mineral utama berupa *cassiterite* dan kuarsa yang berasosiasi dengan mineral sulfida terutama pirit, pirotit, stanit, kalkopirit, sfalerit, dan arsenopirit.

d. *Porphyry W*

Endapan ini membentuk *stockwork* yang disusun oleh *veinlet* kuarsa kaya akan W dan rekahan-rekahan pada batuan intrusif yang bersifat felsik. Bijih mineral sangat dikontrol oleh pola struktur yang berkembang berupa *scheelite* atau *wolframite*, Mineral bijih lainnya yang sering dijumpai yaitu molibdenit, bismuth, dan *cassiterite*. Endapan porfiri jenis ini berasosiasi dengan kehadiran batuan S-type yang dengan kondisi magma yang tereduksi (*reduced magma*) hanya ditemukan di Cina dan Kanada.





Gambar 9 4 Model skematik asal-usul dan proses pembentukan dari macam-macam jenis endapan porfiri (Cu,Mo, W) (Robb, 2005).

Endapan porfiri Cu-Au pertama kali dikenalkan oleh Sillitoe (1972) untuk jenis endapan porfiri Cu yang memiliki kadar Au lebih dari 0,4 g/t Au. Endapan porfiri Cu-Au memiliki beberapa karakteristik antara lain adalah (Lowel dan Guilbert, 1970 dalam Pirajno, 2009):

- Kehadiran dari veins dan veinlet yang membentuk stockworks, dengan kehadiran Cu, Mo, Pb, Zn sulfida dan native element (Au, W, Bi, dan Sn).
- Mineralisasi berasosiasi dengan beberapa fase dari intrusi batuan beku berjenis intermediet yang dapat berupa *stocks*, *dykes*, atau *intrusive breccia*, dimana setidaknya salah satu diantara intrusi tersebut memperlihatkan tekstur porfiritik.
- Zona alterasi - mineralisasi, biasanya berada disekitar batas intrusi yang berdekatan dengan batuan dinding, memiliki daerah yang luas dan memperlihatkan pola yang sistematis.
- Satu tonnase dari endapan Porfiri Cu-Au memiliki kadar 0,2-2% Cu dan 0,4-4% g/t Au.

Endapan porfiri, berasosiasi dengan daerah orogenic belt, dengan lempeng samudra menonjol dibawah lempeng benua (*active continental margin*) atau samudra (busur kepulauan) atau daerah intrakontinen (Sillitoe, 1972). Tektonik juga memiliki andil yang besar dalam pembentukan endapan dimana endapan ini biasa terbentuk dalam zona tektonik yang kompresif.



Sistem porfiri pada zona subduksi biasanya berasosiasi dengan kuarsa monzonit, granodiorit, dan diorit yang kebanyakan bersifat calc-alkaline, akan tetapi beberapa endapan porfiri juga ada yang berasosiasi dengan kandungan calc-*alkaline* yang besar. Pada zona subduksi, endapan porfiri Cu - Au biasanya terbentuk pada daerah busur kepulauan, seperti Batu Hijau, Indonesia.

2.2.3.3. Model Endapan Porfiri

Sistem endapan porfiri berkembang di atas dapur magma yang luas pada kedalaman sekitar 5 sampai 15 km di bawah permukaan bumi yang merupakan tempat bertemunya panas dari tubuh intrusi batuan porfiritik dengan larutan pembawa mineral bijih dengan pola membentuk kubah konsentris yang bertitik pusat pada tubuh batuan intrusi. Proses alterasi yang terjadi pada sistem endapan ini yaitu antara lain: adanya penambahan *volatite* (alterasi propilitik), hidrolisis (serisitik, argilik lanjutan), pergantian alkali (potasik, alterasi sodik-kalsik) dan penambahan silika. Faktor utama yang menyebabkan proses alterasi tersebut yaitu; suhu, tekanan, komposisi larutan, dan komposisi larutan eksternal (air meteorik, air laut, evaporit).

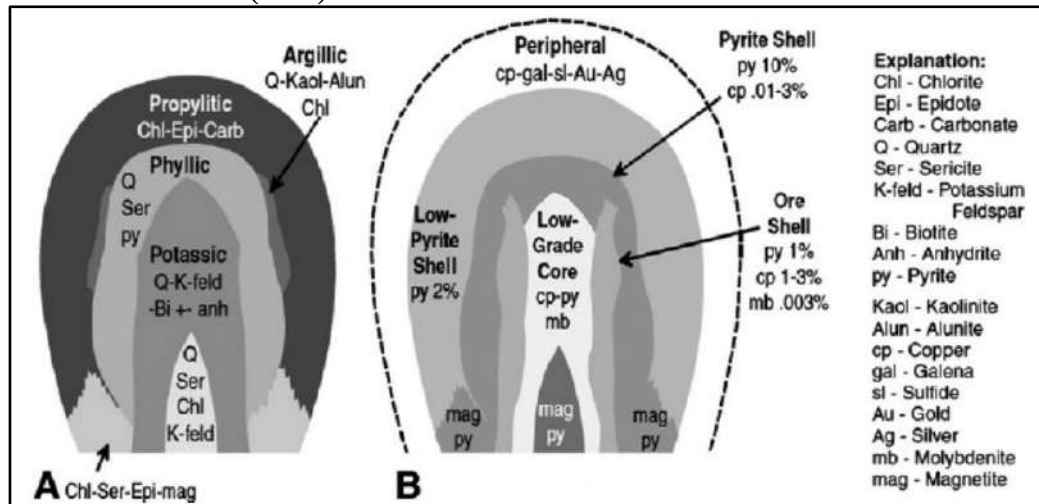
Sistem endapan tembaga porfiri pada umumnya memperlihatkan zoning alterasi yang digambarkan secara skematik oleh Lowel & Guilbert (1970). Sistem endapan ini ditutupi oleh alterasi potasik yang dikelilingi oleh propilitik akibat reaksi hidrasi bersuhu sedang. Pada bagian atas dari tubuh porfiri, terbentuk *advanced argillic* dan kemungkinan *lithocap vuggy quartz* oleh akibat pencucian larutan yang bersifat asam yang merupakan zona dari sistem endapan *high-sulphidation*. Model tersebut memperlihatkan secara umum alterasi pada sistem endapan ini disusun oleh serisitisasi dan hasil presipitasi dari bijih utama menindih alterasi potasik (yang ditunjukkan oleh penggantian mineral mineral mafik oleh biotit) dan propilitik yang telah lebih dahulu terbentuk. Urutan dari potasik sampai *advanced argillic* dihasilkan oleh adanya kenaikan tingkat keasaman dari larutan.

Sistem hidrotermal yang menghasilkan bijih di kedalaman memungkinkan menghasilkan bijih sampai dengan di permukaan yang dibawa oleh urat-urat dan endapan bijih mata air panas. Endapan tipe skarn akan terbentuk terjadi kontak dengan batuan yang kaya akan karbonat. Seedorf, dkk. (2005)



melaporkan daftar tipe alterasi pada sistem endapan porfiri beserta mineralisasi sulfida yang terbentuk.

Gambar 10 Kenampakan skematik dari zona alterasi hidrotermal (a) dan mineralisasi (b) pada sistem endapan tembaga - molibdenit porfiri berdasarkan Lowel & Guilbert (1970).



Tabel 2 Daftar tipe alterasi dan kumpulan mineral serta sulfide yang dijumpai pada sistem endapan porfiri.

Alteration type	Silicate mineral assemblages (minor phases or not necessarily present) $\pm$ quartz	Principal sulphide-oxide assemblages
Potassic	K-feldspar, biotite (albite, topaz, tourmaline, chlorite)	Bornite $\pm$ digenite $\pm$ magnetite; chalcocite $\pm$ pyrite; magnetite $\pm$ chalcocite, magnetite, molybdenite, titanite, ilmenite
Transitional potassic-sericitic	K-feldspar, biotite, sericite (albite, topaz, tourmaline, chlorite)	Bornite $\pm$ chalcocite $\pm$ magnetite; chalcocite $\pm$ magnetite; chalcocite $\pm$ pyrite; molybdenite, titanite, rutile
Sericitic (phyllic, quartz-sericite-pyrite)	Sericite, chlorite	Chalcocite $\pm$ pyrite $\pm$ molybdenite, pyrite, hematite, sphalerite, galena, hematite, rutile
Transitional potassic-advanced argillic	K-feldspar, biotite, andalusite, albite (topaz, tourmaline, cordierite, corundum)	Chalcocite, molybdenite, magnetite, ilmenite
Transitional potassic-sericitic-advanced argillic	K-feldspar, biotite, andalusite (topaz, tourmaline, cordierite, albite)	Bornite $\pm$ chalcocite $\pm$ magnetite; chalcocite $\pm$ pyrite $\pm$ magnetite; molybdenite $\pm$ chalcocite $\pm$ pyrite; titanite
Transitional sericitic-advanced argillic	Sericite, andalusite, pyrophyllite, kaolinite, dickite, diaspore, alunite, (albite) $\pm$ topaz, tourmaline, dumortierite	Pyrite $\pm$ bornite; chalcocite, pyrite, enargite, rutile
High-T advanced argillic	Andalusite, diaspore, topaz, dumortierite, cordierite, (corundum, albite)	Pyrite, rutile
Moderate-T advanced argillic	Pyrophyllite, diaspore, topaz, dumortierite, zunyite (albite)	Covellite, digenite, chalcocite, bornite, enargite, pyrite, hematite, rutile
Low-T advanced argillic	Kaolinite-dickite, diaspore (albite) $\pm$ topaz, dumortierite, zunyite	Covellite, digenite; chalcocite, bornite, enargite, pyrite, marcasite, hematite, rutile, goethite, brookite?
Intermediate argillic	Sericite-illite, kaolinite, montmorillonite, chlorite	Chalcocite, pyrite (pyrrhotite), hematite, cassiterite, stannite, bismutite, hematite, rutile
Propylitic	Albite, sericite-illite, montmorillonite, chlorite, (zoisite, clinozoisite, sericite, actinolite) (basaltic) and/or	(Bornite, chalcocite, pyrite, pyrrhotite, molybdenite, galena, tetrahedrite, hematite, magnetite, titanite, rutile)
Siliceo-sodic-calcic	Quartz, tourmaline?	(molybdenite, zircon)
Sodic	Actinolite, epidote, (plagioclase)	Titanite, rutile
Sodic	Albite, chlorite, epidote, tourmaline, sericite	Pyrite, rutile, (titanite)

Seedorf, dkk., (2005)



2.2.4. Endapan Skarn

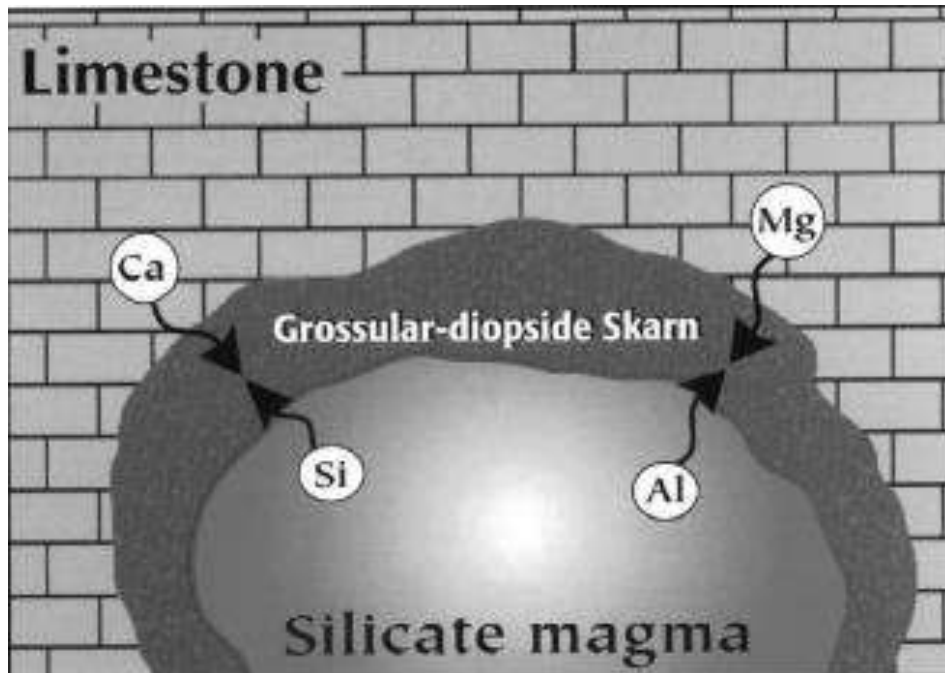
Skarn adalah istilah yang digunakan untuk menjelaskan suatu batuan yang didominasi oleh mineral-mineral calc-silica yang terbentuk oleh proses penggantian atau *replacement* dari batuan yang bersifat karbonat selama proses metamorfisme atau akibat adanya kontak dengan proses metasomatisme yang berasal dari suatu intrusi batuan beku (Meinert, dkk. 2005; Pirajno, 2009).

Istilah skarn berasal dari Negara Swedia yang merupakan sebuah istilah pertambangan yang digunakan untuk menggambarkan kehadiran mineral-mineral pengotor (*gangue mineral*) yang berbutir kasar dan kaya akan *calcium-silicate* di beberapa endapan bijih besi. Skarn dapat terbentuk selama proses metamorfisme regional atau kontak dan dari proses metasomatisme yang melibatkan larutan yang berasal dari magma, metamorfik, meteorik, dan marin.

Pada umumnya endapan skarn dijumpai berdekatan dengan tubuh batuan beku plutonik, di sepanjang jalur patahan regional, pada sistem panas bumi yang dangkal, pada dasar samudra, dan pada kerak benua bagian bawah. Skarn juga sangat umum dijumpai berdekatan dengan endapan tipe porfiri. proses terjadinya skarn melibatkan proses metamorfisme kontak yang bertemperatur tinggi. Magma yang kaya akan silika mengintrusi batuan sedimen yang kaya akan karbonat seperti batugamping.

Daerah atau zona yang dekat dengan intrusi tersebut akan mengalami proses pembakaran (*baked*) dan terjadi proses metamorfisme kontak yang selanjutnya akan terjadi penambahan unsur-unsur penyusun dari magma ke dalam batugamping (metasomatisme), terutama penambahan unsur silica dan calcium- dan pengurangan unsur pada batugamping. Unsur silica dan calcium tersebut akan bergabung untuk membentuk mineral-mineral yang kaya akan calcium silica pada temperatur yang tinggi





Gambar 11 Diagram proses pembentukan endapan skarn yang sederhana. Pemanasan yang terjadi pada batugamping dan penambahan unsur silica, aluminium dan unsur-unsur lainnya yang berasal dari magma yang mengintrusi menghasilkan sebuah daerah kontak yang berbentuk halo yang mengandung mineral yang kaya akan *calcium silicate*.

2.2.4.1. Mineralogi dan Alterasi

Identifikasi dan klasifikasi tipe skarn berdasarkan dari kandungan mineralogi. Pada umumnya mineral skarn adalah mineral pembentuk batuan, namun ada beberapa mineral yang sedikit terkandung dan memiliki mineral penyusun yang bervariasi sehingga dapat menghasilkan informasi mengenai lingkungan dari formasi pembentukan skarn tersebut. Pada umumnya endapan skarn didominasi oleh mineral yang kaya akan Ca – Si terutama garnet dan piroksin sehingga mineralogi endapan skarn sangat bergantung pada jenis-jenis dari kedua mineral tersebut. *Internal zoning* dan jenis-jenis generasi dari kedua mineral tersebut merupakan fungsi dari perubahan kondisi fisika-kimia larutan. Karena hal tersebut, analisis kimia mineral dari keduanya sangat penting dalam mengenali asal-usul dan tipe dari endapan skarn. Secara mineralogi, kumpulan mineral Ca-Si yang dijumpai dibedakan menjadi *anhydrous* dan *hydrous mineral*. Endapan bijih skarn terbentuk akibat kontak antara batuan sumber

batuan karbonat. Zona ini sangat dipengaruhi oleh komposisi batuan yang kaya dengan mineral karbonat. Pada kondisi yang kurang akan air, zona ini oleh pembentukan mineral garnet, klinopiroksin, dan wollastonit serta



mineral magnetit dalam jumlah yang cukup besar, sedangkan pada kondisi yang kaya akan air, zona ini dicirikan oleh mineral klorit, tremolit–aktinolit dan kalsit dan larutan hidrotermal. Garnet-piroksen-karbonat adalah kumpulan yang paling umum dijumpai pada batuan induk karbonat. Amfibol umumnya hadir pada skarn sebagai mineral tahap akhir yang menutupi mineral-mineral tahap awal. Aktinolit (CaFe) dan tremolit (CaMg) adalah mineral amfibol yang paling umum hadir pada skarn. Jenis piroksin yang sering hadir adalah diopsid (CaMg) dan hedenbergit (CaFe).

Skarn mineralogy (hydrous)				
General group	End Members	Abrev.	Composition	Sub-groups
Epidote	pistachite	Ps	$\text{Ca}_2\text{Fe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	epidote
	clinozoisite	Cz	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	epidote	Ep	$\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	piemontite	Pm	$\text{Ca}_2\text{MnAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
	allanite	All	$(\text{CaREE})_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	
Amphibole	tremolite	Tr	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	actinolite
	ferroactinolite	Ft	$\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	Mn actinolite	Ma	$\text{Ca}_2\text{Mn}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	hornblende	Hb	$\text{Ca}_2\text{Mg}_4\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	hastingsite
	pargasite	Pg	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	ferrohastingsite	Fh	$\text{NaCa}_2\text{Fe}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	cummingtonite	Cm	$\text{Fe}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	sub-calcic
	dannemorite	Dm	$\text{Mn}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
	grunerite	Gru	$\text{Fe}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	
Garnet	grossularite	Gr	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	grandite
	andradite	Ad	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	
	spessartine	Sp	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	sub-calcic
	almandine	Al	$\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	
	pyrope	Py	$\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	
Pyroxene	diopside	Di	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	salite
	hedenbergite	Hd	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	
	johannsenite	Jo	$\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$	
Pyroxenoid	wollastonite	Wo	CaSiO_3	bustamite
	rhodonite	Rd	MnSiO_3	pyroxemanite
	ferrosilite	Fs	FeSiO_3	
Olivine	forsterite	Fo	Mg_2SiO_4	knebelite
	fayalite	Fa	Fe_2SiO_4	
	tephroite	Tp	Mn_2SiO_4	glaucochroite
	monticellite	Mo	Ca_2SiO_4	

Gambar 12 Mineralogi endapan skarn. (Meinert, dkk. 2005)



Endapan tipe skarn mengandung banyak mineral bijih seperti Fe, W, Cu, Pb, Zn, Mo, Ag, Au, U, REE, F, B dan Sn. Walaupun pada dasarnya endapan skarn identik dengan batugamping, namun endapan skarn juga bisa terbentuk pada jenis batuan lainnya seperti shale, sandstone, granite, basalt, dan komatite.

Alterasi pada endapan skarn terbentuk pada fluida yang mempunyai salinitas tinggi dengan suhu tinggi (sekitar 300°–700°C). Proses pembentukan skarn akibat urutan kejadian isokimia - metasomatisme - retrogradasi dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Isokimia merupakan transfer panas antara larutan magma dengan batuan sampling, prosesnya H₂O dilepas dari intrusi dan CO₂ dari batuan sampling yang karbonat. Proses ini sangat dipengaruhi oleh temperatur, komposisi, dan tekstur host rock nya (sifat konduktif).
2. Metasomatisme, pada tahap ini terjadi eksolusi larutan magma ke batuan sampling yang karbonatan sehingga terbentuk kristalisasi pada celah-celah atau rekahan yang dilewati larutan magma.
3. Retrogradasi merupakan tahap ketika larutan magma sisa telah menyebar pada batuan sampling dan mencapai zona kontak dengan *water falk* sehingga air tanah turun dan bercampur dengan larutan.

2.2.4.2. Tipe Zonasi Mineralisasi Bijih

Einaudi (1982) dalam Pirajno (2009) membuat klasifikasi pengendapan mineral bijih berdasarkan morfologi dan tekstur dasar menjadi 2, yaitu tipe mineralisasi *disseminated* dan *lode*. Kedua tipe ini dapat terendapkan dalam satu cebakan yang sama. Zonasi secara vertikal dan horizontal pada kedua tipe ini baik *disseminated* maupun *lode* kemungkinan bisa hadir dan berhubungan dengan jarak dari intrusi porfiri batuan beku, namun, pembentukan kedua tipe zonasi mineralisasi ini juga tergantung pada litologi yang diubah oleh intrusi pluton, seperti batugamping dan batulanau karbonatan akan berbeda tipe zonasi mineralisasinya, dua tipe ini memiliki ciri mineral yang berbeda berdasarkan jaraknya dengan

aitu:

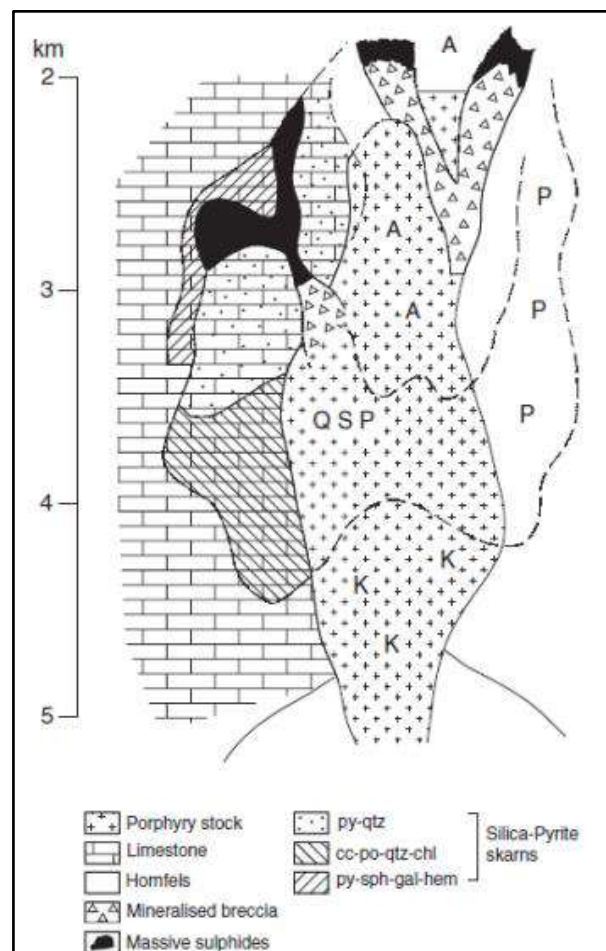


1. Tipe Disseminated

Zona Proksimal	Bornit + kalkopirit + magnetit
Zona Intermediet	Pirit + kalkopirit
Zona Tepi	Pirit ± kalkopirit ± tenantit ± sfalerit ± galena ± pirotit
Zona Distal	Karbonat ± pirit ± kalkopirit ± magnetit ± sfalerit ± pirotit

2. Tipe Lode

Zona Proksimal	Pirit + digenit + enargit ± mineral Sn-Bi-W
Zona Intermediet	Pirit + bornit + kalkopirit + tenantit ± sfalerit
Zona Tepi	pirit + kalkopirit + tenantit + sfalerit + galena ± hematit
Zona Distal	karbonat + pirit + bornit + kalkopirit + tenantit + sfalerit + galena + magnetit



3 Zonasi alterasi yang umumnya ditunjukkan oleh suatu endapan skarn yang berasosiasi dengan endapan porfiri. A = argilik, QSP phyllic = quartz-sericit-pyrite, P = Propilitik, K = potasik. (Eunaudi, 1982; Meinart, dkk. 2000).



2.2.4.3. Klasifikasi Skarn

Menurut Eunaudi, 1982 Skarn dapat dibagi berdasarkan beberapa kriteria di antaranya berdasarkan skala, batuan asal (*protolith*) yang berubah, dan logam yang dikandungnya. Berdasarkan skala, endapan skarn dibagi menjadi :

Reaction skarn

Dicirikan dengan penyebaran yang tidak luas, umumnya berkisar dari mm sampai dengan cm dan sering disebut dengan *local exchange skarn* yang terbentuk dari proses *high grade regional metamorphism* pada kontak antara serpih dan batugamping.

Replacement skarn

Umumnya memiliki penyebaran yang luas, berkisar antara 1 m sampai dengan ratusan meter dan sering disebut dengan *ore skarn* karena menghasilkan mineralisasi yang terbentuk dari adanya proses infiltrasi dari larutan yang berasal dari intrusi batuan beku yaitu sebagai berikut :

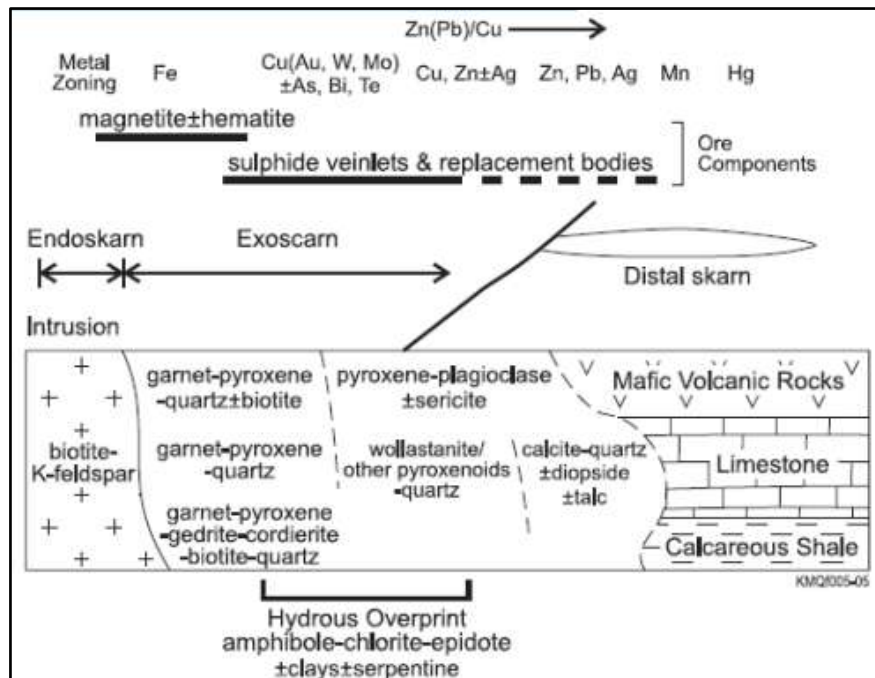
a. Endoskarn

Skarn yang terbentuk didalam intrusi batuan beku, hasil percampuran antara batuan beku tersebut dengan batuan sampling karbonat.

b. Exoskarn

Skarn yang terbentuk pada batuan sedimen karbonat sebagai hasil reaksi dari intrusi batuan beku yang membawa fluida hidrothermal. Exoskarn sendiri dapat dibagi menjadi 2, yaitu exoskarn yang dijumpai pada batuan yang bersifat dolomitik yang kaya akan Mg dengan mineral-mineral penciri seperti forsterit, serpentinit, dan biasa disebut magnesian skarn, dan exoskarn yang dijumpai pada batuan yang kaya akan karbonat dan Ca dengan mineral penciri berupa andradite, hedenbergite, dan biasa disebut dengan *calcic skarn*.





Gambar 14 Model endapan skarn yang memperlihatkan tipe endapan eksoskarn dan endoskarn beserta kumpulan mineralogi dan mineral bijih yang terbentuk (Meinert, 1998).

Berdasarkan logam yang dikandungnya (Tabel 3), Eunaudi (2005) membagi endapan skarn menjadi beberapa tipe yaitu sebagai berikut :

a. iron-skarn (Fe-skarn)

Merupakan tipe endapan skarn yang paling luas ditemukan di dunia. Tipe skarn ini merupakan sumber utama dari bijih magnetit sebagai sumber utama Fe dan sedikit Cu, Co, Ni, dan Au. Banyak endapan yang mengandung potensi Fe yang cukup besar (>500 juta ton, >300 juta ton) yang terdiri dari magnetit dengan hanya sedikit mineral pengotor silika. Terdiri dari calcic dan magnetit Fe skarn. Calcic Fe skarn cenderung dijumpai pada busur kepulauan yang bersifat oseanik, yaitu tubuh plutonik yang kaya akan Fe mengintrusi batugamping dan batuan gunungapi. Magnetit-Fe skarn sebaliknya berasosiasi dengan tubuh plutonik dengan komposisi lebih beragam namun didominasi oleh granodiorit yang membentuk stock berukuran kecil, *dyke*, *breccia pipe* dan *sill* pada beragam lingkungan tektonik. Tipe ini berkembang pada batuan yang bersifat *dolomitic* (*Mg-rich carbonate rock*).

b. Tungsten skarn (W skarn)

Merupakan tipe skarn yang umumnya dijumpai pada tubuh plutonik yang calc-alkaline yang dicirikan dengan kehadiran metamorphic aureole



temperatur tinggi dan pegmatit. Mineral utama dari endapan ini yaitu wolframit dan scheelite. Dijumpai di Australia, Tasman Fold Belt System.

c. Copper skarn (Cu-skarn)

Merupakan tipe endapan skarn yang paling banyak ditemukan di dunia (Meinert, dkk., 1993; Meinert, dkk., 2005). Biasanya berasosiasi dengan plutonik jenis I-type dan magnetite-series yang dijumpai pada kedalaman relatif dangkal yang mengalami alterasi hidrotermal intensif. Tipe skarn ini dicirikan dengan kehadiran garnet yang bersifat andradit (Mn-rich), diopsid, wolastonit, aktinolit, dan epidot. Garnet dijumpai berlimpah di dekat dengan tubuh pluton, sedangkan sulfida yang umum dijumpai yaitu pirit, kalkopirit, dan bornit. Contohnya yaitu Bingham di Utah, USA yang merupakan Cu-skarn deposit terbesar di dunia dengan kandungan sekitar 90 juta ton Cu 0.8% (Laznika, 2006).

d. Zinc-lead skarn (Zn-Pb skarn)

Merupakan endapan skarn yang dijumpai pada lingkungan kontinen yang berasosiasi dengan subduksi maupun rifting. Sumber bijih utama yaitu Zn, Pb, dan Ag yang didominasi oleh Zn. Berasosiasi dengan jenis batuan beku yang berkomposisi granit silika tinggi sampai dengan diorite. Skarn ini dibedakan dengan jenis skarn yang lainnya oleh melimpahnya kandungan mineral kaya Mn dan Fe. Selain itu, biasanya dijumpai pada daerah kontak batuan dan zona struktur serta tidak dijumpainya metamorphic aureole.

e. Tin-tungsten skarn (Sn-W skarn)

Merupakan tipe skarn yang didominasi oleh granit dengan silika yang tinggi dan umumnya berasosiasi dengan alterasi tipe greisen dan aktivitas F yang tinggi yang biasanya tidak dijumpai pada endapan skarn yang lainnya. Sn skarn berhubungan dengan tubuh batuan granit yang dihasilkan oleh adanya proses partial melting dari kerak kontinen pada rift setting. Zona yang dibentuk yaitu dari calcic-magnesian, oxide-rich sampai dengan sulphide-rich dan mengandung F-B-Be-Li-W-Mo.

Di beberapa lokasi dijumpai gold-bearing skarn yang biasanya berasosiasi dengan Cu- atau Fe-skarn. Namun karena nilai ekonomis emas yang cukup tinggi, peneliti kemudian memisahkan tipe goldbearing skarn menjadi tipe Cu-Fe-skarn. Pada umumnya gold-bearing skarn berasosiasi dengan endapan Cu, Fe,



Zn-Pb dan porphyry Cu- related skarn. Gold-bearing skarn dapat dijumpai pada beberapa jenis batuan sedimen dan beku, di antaranya batugamping, dolomit, serpih, konglomerat, tufa andesitic sampai riolitik dan batuan granitik. Karena keberadaannya yang sangat sedikit, laporan-laporan tentang keberadaan gold-skarn tidak terlalu banyak yang dipublikasikan. Namun, di Cina gold-skarn memberikan kontribusi emas yang lumayan besar yaitu hingga 1000 ton yang merupakan 20% dari total emas yang ada dihasilkan oleh Cina.

Tabel 3 Karakteristik dari beberapa tipe endapan skarn berdasarkan kandungan logam.

Type of skarn deposit	Iron	Tungsten	Copper	Zinc-lead	Tin-tungsten
typical size	5-200 Mt	0.1-2 Mt	1-100 Mt	0.2-3 Mt	0.1-3 Mt
typical grade	40 % Fe	0.7 % WO ₃	1-2 % Cu	9 % Zn, 6 % Pb, 150 g Ag/t	0.1-0.7 % Sn
metals (or elements) associated	Fe (Cu,Co,Au)	W,Mo,Cu (Zn,Bi)	Cu (Mo,Zn,W)	Zn,Pb,Ag (Cu,W)	Sn,F,W (Se,Zn)
tectonic settings	oceanic island arc; rifted continental margins	continental margin, syn- to late orogenic	continental margin, syn- to late orogenic	continental margin, syn- to late orogenic	continental; late to postorogenic or anorogenic
associated igneous rocks	gabbro to syenite, diorite	quartz diorite	granodiorite	plutons commonly absent; if present, granite to diorite	granite
pluton morphology	large to small stocks, dikes	large plutons, batholiths	small stocks, dikes, breccia pipes	if present, stocks and dikes	stocks, batholiths
early minerals	pyroxene (Hd ₂₅₋₃₀), garnet (And ₂₅₋₃₅), epidote, magnetite	pyroxene (Hd ₄₀₋₆₀), garnet (And ₂₀₋₃₀), vesuvianite, wollastonite	garnet (And ₄₀₋₆₀), diopside pyroxene (Hd ₅₋₁₀), wollastonite	Mn-rich hedenbergite (Hd ₃₀₋₄₀), garnet (And ₂₀₋₃₀), Sp ₅₋₁₀ , bustamite, rhodonite	vesuvianite, spessartite-rich garnet, Sn-containing garnets, danburite, datolite
late minerals	amphibole, chlorite	garnet (Sp ₅₋₁₀ , And ₅₋₁₀), biotite, hornblende, plagioclase	actinolite, chlorite	Mn actinolite, chlorite, rhodochrosite	amphibole, mica, tourmaline, chlorite, fluorite
ore minerals (only main minerals are listed)	magnetite (chalcopryrite, cobaltite, pyrrhotite)	scheelite, molybdenite, chalcopryrite	chalcopryrite, pyrite, hematite, magnetite	sphalerite, galena, pyrrhotite, pyrite, magnetite	cassiterite, wolframite

2.2.4.4. Geometri dan Tatanan Tektonik

Endapan skarn yang paling banyak dijumpai adalah endapan yang berasosiasi dengan busur magmatik (magmatic arc) yang berhubungan dengan subduksi di bawah kerak kontinen (Meinert, dkk. 2005). Tubuh plutoniknya berkomposisi berkisar antara diorit sampai dengan granit walaupun perbedaan antara jenis logam dasar pada endapan skarn cenderung menggambarkan kondisi geologi lokal (kedalaman pembentukan, struktur, dan jalur fluida) daripada perbedaan dari segi petrogenesisnya.



Ada beberapa tipe skarn yang tidak berasosiasi dengan magmatisme yang gan dengan subduksi, yaitu skarn yang berasosiasi dengan magma tipe-S (*nagmatism*) yang muncul setelah periode utama dari subduksi atau si dengan proses rifting dari sebuah craton yang sebelumnya stabil. Calcic

Fe-Cu skarn adalah satu-satunya jenis skarn yang berasosiasi dengan lingkungan oceanic island-arc yang biasanya dijumpai bersama dengan pengayaan Co, Ni, Cr, dan Au. Selain itu, beberapa endapan skarn yang ekonomis juga ditemukan terbentuk di busur belakang samudra yang berasosiasi dengan busur vulkanik. Ada beberapa lingkungan tektonik yang memungkinkan skarn dapat terbentuk yaitu antara lain: 1) lingkungan subduksi dengan sudut penunjaman yang terjal pada kerak oseanik; 2) subduksi dengan sudut penunjaman yang relatif kecil pada lingkungan transisi; 3) subduksi pada kerak kontinen, dan 4) bukaan kontinen (continental rifting) (Meinert, dkk. 2005). Gambar 5.5 berikut memperlihatkan lingkungan tektonik tempat endapan skarn berkembang.

2.3. Geometalurgi

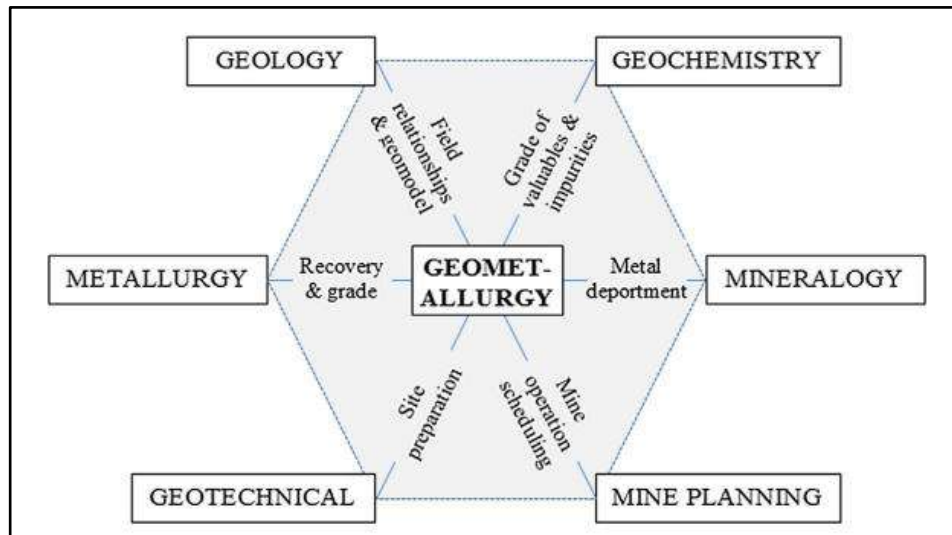
Geometalurgi merupakan pendekatan interdisiplin yang menghubungkan karakteristik geologi, geokimia, dan mineralogi dengan performa metalurgi dari suatu *ore body* (Zhou, 2013). Ilmu Geometalurgi sangat relevan pada studi kelayakan dan fase operasional. Secara keseluruhan, geometalurgi menggabungkan prinsip mineralogi proses dan karakterisasi material sebagai alatnya metalurgi prediktif. Hal ini melengkapi, namun tidak menggantikan pendekatan metalurgi tradisional selama pengembangan proyek dan operasi tambang. Dengan fokus utama pada pengambilan sampel, perencanaan kerja pengujian, dan integrasi data.

Dalam pengaplikasian nya geometalurgi telah digunakan di semua tahapan utama dari berbagai proyek mineral termasuk pelingkupan, studi kelayakan, desain dan optimalisasi proses yang mencakup proyek emas, tembaga, molibdenum, dan nikel, serta besi selama dua dekade terakhir. Sehingga geometalurgi memainkan peran yang semakin penting dalam aspek-aspek berikut.

- Alur pengembangan.
- Pemilihan peralatan.
- Perencanaan Tambang.
- Desain dan optimalisasi pabrik.
- Prediksi produksi.



Pendekatan geometalurgi untuk perencanaan tambang dan desain pabrik didasarkan pada identifikasi berbagai atribut yang berkontribusi pada nilai realisasi sumber daya. Secara kolektif atribut ini merupakan karakterisasi material dan selain atribut tradisional seperti tingkat komponen ekonomi, termasuk atribut yang kurang tradisional (S. Dunham dan J. Vann, 2007).



Gambar 15 Berbagai disiplin ilmu yang penting dalam geometalurgi diadaptasi dari William and Richardson (2004).

2.3.1. Pengolahan Bahan Galian

Pengolahan Bahan Galian (*Mineral Processing*) adalah proses/operasi dimana bahan galian diolah dengan menggunakan sifat fisika/kimia mineral sehingga menghasilkan produk yang dapat dijual (*concentrate*) dan produk yang tidak berharga (*tailing*) dengan tidak merubah sifat fisik/kimia bahan galian tersebut. Yang dimaksud dengan bahan galian adalah bijih (*ore*), mineral industri (*industrial minerals*) atau bahan galian Golongan C dan batu bara (*coal*).

Keuntungan melakukan pengolahan bahan galian ialah :

1. Mengurangi ongkos pengangkutan.
2. Mengurangi kehilangan logam berharga pada saat peleburan.
3. Mengurangi ongkos peleburan.
4. Pemisahan secara fisik jauh menguntungkan dibanding dengan cara kimia.

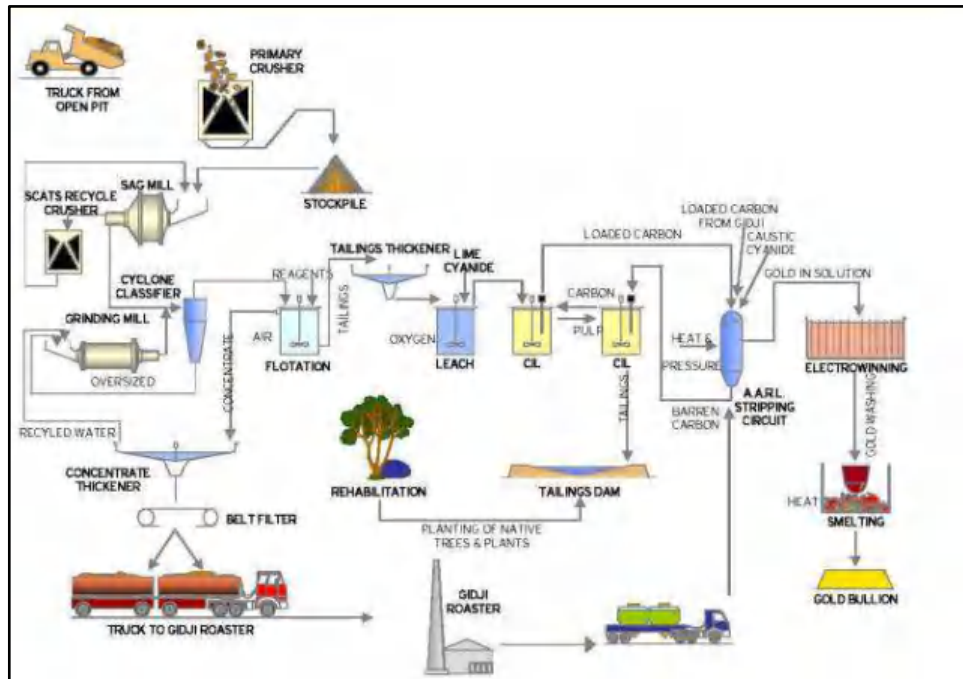
Tahap-tahap utama pengolahan bahan galian terdiri dari :

Kominusi (reduksi ukuran).

Sizing (pemisahan berdasarkan ukuran).



3. Proses konsentrasi (peningkatan kadar) dengan berbagai metode yang digunakan (Hal ini berkaitan dengan sifat kimia dan fisika dari mineral).
4. *Dewatering* (pengurangan kadar air).
5. *Materials handling* (penanganan material).



Gambar 16 Skema proses pengolahan dan peleburan bijih emas.

2.4. *Material Type Zone*

Material Type Zone (MATZN) adalah terminologi lokal yang diperkenalkan oleh PT Freeport Indonesia (PTFI) yang mendefinisikan domain kominusi yang digunakan untuk mengakomodasi masalah perkiraan pabrik terkait dengan perubahan geologis dan memudahkan perkiraan saat melakukan *throughput* SAG mill dengan model regresi produksi yang terbukti baik karena telah dikembangkan selama bertahun-tahun. Pada saat yang sama, pengembangan MATZN juga diperluas untuk tujuan pengeboran dan peledakan.

Material Type Zone ditentukan pada kombinasi parameter yang ada di geologi seperti *Ore Grade*, *Rock Quality Designation* (RQD), *Rock Type* (RT) dan Alterasi, hal ini karena untuk memudahkan menentukan kapasitas *throughput* baru *ling* SAG mill yang ada, program geometalurgi dimulai dengan mengukur 1 bijih dengan parameter dan pemodelan plot di seluruh tubuh bijih.



2.5. Karakteristik *Problematic Ore*

Tambang terbuka Grasberg mempunyai 5 (lima) tipe ore berdasarkan pada nilai perolehan tembaga, kadar bijih, kekerasan, dan material/mineral pengotornya. Keempat tipe ore tersebut adalah: Tipe A, Tipe B+, Tipe B, Tipe C dan Tipe D. Tipe A sampai Tipe C dikategorikan sebagai ore bersih dan tidak bermasalah, sedangkan Tipe D disebut sebagai Tipe ore yang bermasalah (*problematic ore*).

Secara geologi, tipe bijih bermasalah (*problematic ore*) adalah material-material yang mengandung: mineral serisit lebih dari 10%, pirit 3-5%, lempung 3-5% dan mengandung Pb-Zn lebih dari 800 ppm. Tipe bijih ini berada di batuan “Breksi Vulkanik”, “Dalam Fragmental” dan daerah kontak antara batuan intrusi dan batuan samping/batugamping. Uji kadar menunjukkan nilai tembaga 0.55% emas, 0.3 gram/ton dengan ekivalen tembaga 0.75%. Pengambilan contoh batuan dilakukan secara rutin untuk keperluan analisis mineral XRD, analisis metalurgi (kekerasan, perolehan tembaga-emas) dan analisis kadar bijih (Setiadi, 2012).

