

**GENESIS DAN KADAR BIJIH MINERALISASI TEMBAGA  
SUPERGEN DI DAERAH TONRA KABUPATEN BONE  
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

*GENESIS AND ORE GRADE OF SUPERGENE COPPER  
MINERALIZATION IN TONRA AREA, BONE  
REGENCY SOUTH SULAWESI PROVINCE*



**TRI ANDRIYANI HS. KANDORA  
D112201005**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERTAMBANGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA  
2022**

**TESIS**

**GENESIS DAN KADAR BIJIH MINERALISASI TEMBAGA  
SUPERGEN DI DAERAH TONRA KABUPATEN BONE  
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

TRI ANDRIYANI HS KANDORA

NIM: D112201005

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang di bentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Teknik Pertambangan Fakultas

Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal, 25 November 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



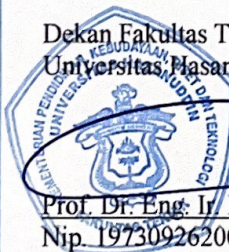
Dr. Ir. Irzal Nur., M.T.  
Nip. 196604091997031002

Pembimbing Pendamping



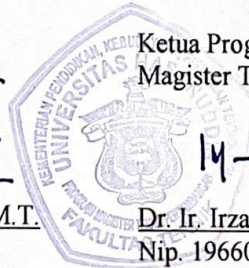
Dr. Ulva Ria Irfan, S.T., M.T.  
Nip. 197006061994122001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muh. Isran Ramli, S.T., M.T.  
Nip. 197309262000121002

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Pertambangan



Dr. Ir. Irzal Nur, M.T.  
Nip. 196604091997031002

## **PERNYATAAN KEASLIAN**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tri Andriyani HS Kandora  
Nim : D112201005  
Program Studi : Teknik Pertambangan  
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **GENESIS DAN KADAR BIJIH MINERALISASI TEMBAGA SUPERGEN DI DAERAH TONRA KABUPATEN BONE PROVINSI SULAWESI SELATAN**

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

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

Gowa, 25 November 2022

Yang menyatakan:



Tri Andriyani HS Kandora

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Tuhan semesta alam atas berkat hidayah taufik serta rahmat kesehatan-Nya sehingga tesis dengan judul “Genesis dan Kadar Bijih Mineralisasi Tembaga Supergen di Daerah Tonra Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan” dapat diselesaikan dengan tepat waktu.

Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan tugas akhir pada Program Pascasarjana Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Dalam penyusunan tesis ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan tesis ini.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Pertambangan sekaligus sebagai pembimbing utama dan Ibu Dr. Ulva Ria Irfan, S.T, M.T., selaku pembimbing pendamping yang telah banyak meluangkan waktu, kesabaran serta memberikan banyak arahan kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian hingga penyusunan tesis. Dengan dukungan yang luar biasa dari awal hingga akhir dari para pembimbing membuat saya mengembangkan pemahaman tentang tesis ini sehingga dapat menyelesaikan penelitian dengan sangat baik.

Terima kasih kepada tim penguji yaitu Bapak Dr. Sufriadin, S.T., M.T., Bapak Dr. Phil. nat. Sri Widodo, S.T, M.T., dan Bapak Asran Ilyas, S.T., M.T., Ph.D yang telah banyak memberikan saran dan masukan kepada penulis untuk perbaikan tesis ini menjadi lebih baik.

Terima kasih kepada yang tercinta orang tua, adik-adik dan keluarga yang telah banyak memberikan dukungan baik secara moril dan materi sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Tak lupa pula ucapan terima kasih kepada seluruh teman-teman Pascasarjana angkatan 2020 Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin dan Aswin Trisakti Syam yang tak henti memberikan semangat, dukungan dan motivasi berjuang dalam menyelesaikan penyusunan tesis ini hingga selesai.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan saran sehingga dapat berkarya lebih baik lagi di masa mendatang dan semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan bernilai ibadah di sisi-Nya.

Gowa, 25 November 2022

Tri Andriyani HS. Kandora

## ABSTRAK

Mineralisasi tembaga supergen ditemukan di Daerah Tonra, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan. Tipe genetik dan kadar bijih endapan tembaga supergen menjadi hal penting sebagai panduan dalam eksplorasi endapan secara lebih detail. Penelitian ini meliputi identifikasi mineralogi *hostrock*, tipe alterasi, himpunan mineral bijih, unsur-unsur *trace element*, REE dan kadar bijih. Metode analisis data di lapangan meliputi kegiatan sampling pada singkapan, sampel kemudian di analisis secara megaskopis untuk dipreparasi menjadi sayatan (tipis dan poles) dan bubuk 200 *mesh*. Metode analisis laboratorium petrografi dan mineragrafi untuk mengetahui tekstur mineral pada batuan, analisis XRD untuk mengetahui mineral-mineral penyusun batuan, dan analisis ICP-MS untuk mengetahui komposisi *trace element*, REE dan kadar bijih. Hasil analisis *hostrock* adalah batuan beku intermedit jenis diorit yang tersusun dari mineral kuarsa, plagioklas, dan biotit. Tipe alterasi di daerah penelitian berdasarkan himpunan mineral alterasinya adalah tipe argilik dengan penciri mineral kuarsa, kaolinit, dan illit, tipe propilitik dengan penciri mineral klorit, epidot, dan karbonat. Endapan supergen *enrichment* dicirikan oleh azurit dan malakit yang merupakan mineral tembaga hidroksida, ditemukan berasosiasi dengan mineral bijih oksida yaitu goetit dan hematit, dan mineral sulfida yaitu sfalerit dan galena. Pola perilaku *trace element* pada mineralisasi tembaga supergen memperlihatkan tingginya unsur Mo-Zn-As-Pb-Ga-Cd-Sn-U sebesar  $\Sigma 159,289$  ppm pada mineralisasi sampel azurit dan  $\Sigma 210,63$  ppm pada mineralisasi sampel malakit. Diagram REE menunjukkan dimana LREE (*Light Rare Element*) lebih rendah pada sampel azurit yaitu sebesar  $\Sigma 28,79$  ppm dan sampel malakit  $\Sigma 11,81$  ppm, sedangkan HREE (*Heavy Rare Earth Element*) lebih tinggi pada sampel azurit sebesar  $\Sigma 41,37$  ppm dan sampel malakit  $\Sigma 22,12$  ppm. Kadar Cu pada mineralisasi sampel azurit  $\text{Cu}_3\text{CO}_3(\text{OH})_2$  ditemukan sebesar 27% dan pada mineralisasi sampel malakit  $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$  sebesar 19%.

Kata Kunci : Tembaga Supergen, Azurit, Malakit, Alterasi Hidrotermal, REE.

## ABSTRACT

A supergene copper mineralization was found in the Tonra Area, Bone Regency, South Sulawesi Province. Genetic type and ore grade of supergene copper deposits are important as a guide in more detailed exploration of deposits. This research includes identification of hostrock mineralogy, alteration type, ore mineral assemblages, trace elements, REE and ore grades. Methods of data analysis in the field include sampling activities on outcrops, samples are then analyzed megascopically to be prepared into sections (thin and polished) and 200 mesh powder. Methods of laboratory analysis are petrography and mineragraphy to determine the texture of rock forming minerals, XRD analysis to determine the rock forming minerals, and ICP-MS analysis to determine the composition of trace elements, REE and ore grades. The results of the hostrock analysis are diorite-type intermediate igneous rocks composed of the minerals quartz, plagioclase, and biotite. The type of alteration in the study area based on the alteration mineral assemblage is the argillic type characterized by the minerals quartz, kaolinite and illite, the propylitic type characterized by the minerals chlorite, epidote and carbonate. Supergene enrichment deposits are characterized by azurite and malachite which are copper hydroxide minerals, found in association with oxide ore minerals, namely goethite and hematite, and sulfide minerals, namely sphalerite and galena. The pattern of trace element behavior in supergene copper mineralization show the high grade of Mo-Zn-As-Pb-Ga-Cd-Sn-U elements of  $\Sigma 159.289$  ppm in azurite mineralization samples and  $\Sigma 210.63$  ppm in malachite mineralization samples. The REE diagram shows where the LREE (Light Rare Element) is lower in the azurite sample, which is  $\Sigma 28.79$  ppm and the malachite sample is  $\Sigma 11.81$  ppm, while the HREE (Heavy Rare Earth Element) is higher grade in the azurite sample, which is  $\Sigma 41.37$  ppm and malachite sample  $\Sigma 22.12$  ppm. The Cu grade in the mineralized azurite sample  $\text{Cu}_3\text{CO}_3(\text{OH})_2$  was found to be 27% and in the mineralized sample malachite  $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$  to be 19%.

Keywords: Supergene Copper, Azurit, Malakit, Hydrothermal Alteration, REE.

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
ABSTRAK.....	vi
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Peneliti Terdahulu.....	2
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Regional.....	5
2.1.1 Geomorfologi.....	5
2.1.2 Stratigrafi .....	5



2.2	Endapan Hidrotermal.....	7
2.3	Klasifikasi Endapan Hidrotermal .....	7
2.3.1	Endapan Epitermal.....	8
2.3.2	Endapan Porfiri .....	9
2.3.3	Endapan Skarn .....	9
2.3.4	Endapan VMS.....	10
2.4	Endapan Sedimenter .....	11
2.4.1	Endapan <i>Banded Iron Formation</i> .....	11
2.4.2	Endapan <i>Placer Deposit</i> (endapan letakan).....	12
2.4.3	Endapan Evaporasi .....	12
2.5	Endapan Hasil Lapukan.....	12
2.6	Tembaga .....	13
2.7	Zona Supergen.....	14
2.8	Oksidasi dan Pengkayaan Supergen .....	15
2.9	Oksidasi dan Pelarutan di Zona Oksidasi .....	16
2.10	Pengendapan Bijih di Zona Oksidasi.....	19
2.11	Pengkayaan Sulfida Supergen .....	20
2.12	Karakteristik Bijih Supergen dan <i>Gangue</i> .....	23
2.13	Lingkungan Pelapukan .....	25
2.14	Sumber Logam .....	26
2.15	Paragenesis Dan Zonasi Tembaga Oksida.....	27
2.16	Implikasi Eksplorasi .....	28
	<b>BAB III. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>30</b>

3.1	Lokasi dan Kesampaian Daerah .....	30
3.2	Studi Literatur.....	30
3.3	Pekerjaan Lapangan.....	31
3.4	Metode dan Analisis Data.....	31
	3.4.1 Analisis Megaskopis .....	31
	3.4.2 Analisis Laboratorium .....	32
3.5	Preparasi Sampel .....	33
	3.5.1 Preparasi Analisis Mikroskop.....	33
	3.5.2 Preparasi Analisis Mineralogi XRD .....	33
	3.5.3 Preparasi Analisis Kimia ICP MS .....	34
3.6	Pengolahan Data.....	34
3.7	Diagram Alir.....	34
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....		36
4.1	Geologi Daerah Penelitian.....	36
4.2	Karakteristik Batuan <i>Hostrock</i> .....	37
	4.2.1 Satuan Diorit.....	37
4.3	Identifikasi Mineral Alterasi.....	40
	4.3.1 Zona Alterasi Kuarsa-Kaolinit-Illit.....	41
	4.3.2 Zona Alterasi Klorit-Epidot-Karbonat.....	44
	4.3.3 Zona Alterasi Klorit-Epidot-Karbonat.....	46
4.4	Bijih Oksida .....	50
4.5	Identifikasi Mineralisasi Tembaga Supergen .....	52
	4.5.1 Mineralisasi ST.5 (azurit) .....	53

4.5.2	Mineralisasi ST.6 (malakit).....	56
4.6	Himpunan Mineral Bijih.....	59
4.7	<i>Trace element</i> dan REE.....	60
4.7.1	<i>Trace Element</i> .....	63
4.7.2	<i>Rare Earth Element</i> dan Yttrium.....	65
4.8	Kadar Bijih Cu.....	69
BAB V. PENUTUP.....		70
5.1	Kesimpulan.....	70
5.2	Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN.....		75
LAMPIRAN A. PETA LOKASI PENELITIAN.....		76
LAMPIRAN B. PETA LOKASI PENGAMBILAN SAMPEL.....		78
LAMPIRAN C. FOTO PENGAMBILAN SAMPEL.....		80
LAMPIRAN D. DESKRIPSI MIKROSKOPIS (PETROGRAFI).....		84
LAMPIRAN E. DESKRIPSI MIKROSKOPIS (MINERAGRAFI).....		90
LAMPIRAN F. DESKRIPSI MINERALOGI (XRD).....		94
LAMPIRAN G. DESKRIPSI UNSUR KIMIA (ICP MS).....		102
LAMPIRAN H. DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN DAN LAMBANG.....		104

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
2.1 Skema tipe endapan epitermal .....	8
2.2 Pola zonasi alterasi-mineralisasi endapan tembaga porfiri.....	9
2.3 Skematik ideal yang menggambarkan karakteristik dari endapan VMS...	11
2.4 Urutan mineralisasi supergen diringkas dari endapan sulfida massif vulkanogenik di kamp pertambangan <i>bathurst</i> .....	24
2.5 Diagram skematis yang menunjukkan lingkungan pelapukan dari mineral yang mengandung sulfida .....	25
2.6 Diagram jalur oksidasi menunjukkan paragenesis oksida tembaga yang berasal dari protolit pirit total rendah hingga sedang .....	27
3.1 Tahapan dan metodologi penelitian.....	35
4.1 (A) Singkapan batuan beku diorit ST.1 (B) Singkapan dan bongkahan batuan beku diorit ST.1 (C) Singkapan batuan beku ST.1 (D) Sampel batuan beku diorit dari ST.1 yang memperlihatkan tekstur hipokristalin oleh mineral utama plagioklas.....	38
4.2 (A) Fotomikrograf (x-silang) sampel ST.1 (B) Fotomikrograf (//-sejajar). (C) Fotomikrograf (x-silang) sampel ST.1. (D) Fotomikrograf (//-nikol sejajar) sampel ST.1. Sampel ST.1 memperlihatkan fenokris-fenokris dari mineral plagioklas (plg) dan biotit (bio) (lampiran D).....	39
4.3 Difraktogram sampel ST.1 .....	40
4.4 Mineral alterasi penunjuk <i>temperature</i> .....	41

4.5	(A) Singkapan batuan teralterasi ST.2 (B) Sampel ST.2 B .....	42
4.6	(A) Fotomikrograf ST.2 (x-silang). (B) Fotomikrograf ST.2 (//-sejajar). Mineral yang hadir merupakan himpunan mineral alterasi kuarsa (qtz) dan <i>clay minerals</i> dan opak (opq) (Lampiran D). .....	43
4.7	Difraktogram sampel ST.2 .....	44
4.8	(A) Singkapan batuan teralterasi ST.3 (B) Sampel ST.3 B .....	44
4.9	Fotomikrograf ST.3 (x-silang) memperlihatkan himpunan mineral alterasi kuarsa (qtz), kalsit (cal), dan mineral opak (opq) (Lampiran D).....	45
4.10	Difraktogram sampel ST.3 .....	46
4.11	(A) Singkapan alterasi di lokasi <i>trenching</i> pada ST.4 (B) Luas lokasi <i>trenching</i> ST.4 (C) Singkapan teralterasi ST.4 (D) Sampel ST.4 .....	47
4.12	Fotomikrograf ST.4 (x-silang) himpunan mineral alterasi pada sampel yaitu <i>clay minerals</i> , klorit (chl), dan kalsit (cal) (Lampiran D) .....	48
4.13	Difraktogram sampel ST.4.....	49
4.14	Singkapan bijih oksida.....	50
4.15	(A) Fotomikrograf (x-silang) ST. 7 sampel bijih oksida dengan kehadiran mineral sfalerit (sph), goetit (goe), dan galena (gn). (B) Fotomikrograf (//- sejajar) ST.7 sampel bijih oksida dengan kehadiran mineral galena (gn) yang tersebar pada tubuh mineral sfalerit (sph) (lampiran E). .....	51
4.16	Difraktogram sampel ST. 7 bijih oksida.....	52
4.17	Singkapan mineralisasi azurit dan malakit. ....	53
4.18	(A) Singkapan mineralisasi azurit yang dijumpai pada tahun 2013 dengan kondisi endapan yang sebagian masih utuh. (B) Singkapan mineralisasi azurit	

yang dijumpai pada tahun 2022 dengan kondisi endapan yang sangat sedikit dan telah lapuk bersama batuan teralterasi dan teroksidasi .....	54
4.19 Fotomikrograf (x-silang) ST.5 ditemukan hadirnya mineral tembaga supergen jenis azurit (az) yang berasosiasi dengan mineral-mineral oksida (lampiran E).....	55
4.20 Difraktogram sampel ST. 5 Azurit .....	56
4.21 Singkapan mineralisasi malakit yang hadir bersama mineralisasi azurit ..	56
4.22 Fotomikrograf (x-silang) ST.6 memperlihatkan hadirnya mineral malakit (mal), goetit (goe) dan sfalerit (sph).....	57
4.23 Fotomikrograf (x-silang) ST.6 malakit (mal) hadir dalam tekstur acicular atau memancar (lampiran E) dan sfalerit (sph) hadir <i>me-replacement</i> malakit (mal).....	58
4.24 Difraktogram sampel ST. 6 Malakit .....	58
4.25 Pengayaan <i>trace element</i> ST.5 sampel azurit .....	63
4.26 Pengayaan <i>trace element</i> ST.6 sampel malakit.....	63
4.27 Grafik perilaku pengayaan <i>trace element</i> pada sampel mineralisasi .....	64
4.28 Grafik perilaku pengayaan REE dan Yttrium pada sampel mineralisasi...	66
4.29 Penggunaan REE di dunia berdasarkan nilai pada Tahun 2006 .....	67

## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
2.1 Mineral bijih tembaga utama .....	13
2.2 Oksidasi dari senyawa logam .....	17
2.3 Warna khas dari logam yang teroksidasi .....	18
2.4 Deret bijih Schurmann.....	21
2.5 Mineral bijih hipogen, supergen, dan oksidasi .....	23
2.6 <i>Mineral assemblages in geochemical domains in high and low mass flux conditions</i> .....	26
4.1 Himpunan mineral alterasi dan tipe alterasi.. .....	50
4.2 Keterdapatan mineral bijih pada pengamatan mineragrafi dan tekstur yang terbentuk pada setiap sayatan poles.....	60
4.3 Konsentrasi unsur di kerak bumi (Taylor and McLennan 1985 dan 1995, Wedepohl 1994, Chondrite (Lodders et al, 2009) dan Chondrite (Anders and Grevesse, 1989).. .....	61
4.4 Hasil analisis <i>trace element</i> dan REE.....	62
4.5 Sumberdaya REE dan distribusi globalnya .....	68
4.6 Hasil analisis kadar Cu sampel mineralisasi.....	69

## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
1. Lampiran A. Peta Lokasi Penelitian .....	76
2. Lampiran B. Peta Lokasi Pengambilan Sampel .....	78
3. Lampiran C. Foto Stasiun .....	80
4. Lampiran D. Analisis Petrografi .....	84
2. Lampiran E. Analisis Mineragrafi .....	90
3. Lampiran F. Analisis XRD .....	94
4. Lampiran G. Analisis ICP-MS .....	102
5. Lampiran H. Daftar Istilah, Singkatan dan Lambang .....	104



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di Daerah Tonra Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan terdapat singkapan mineralisasi tembaga supergen yang berada pada batuan anggota Formasi Kalamiseng, dan secara geografis berdekatan dengan intrusi diorit (Sukanto, 1982). Singkapan mineralisasi ini berasosiasi dengan alterasi yang mengubah batuan vulkanik anggota Formasi Kalamiseng tersebut. Mineralisasi tembaga supergen terbentuk ketika mineral tembaga hipogen terlarutkan dan tertransportasi, kemudian tersimpan selama proses pelapukan (Chavez, 2000). Sisa mineral besi dan tembaga dapat digunakan untuk menafsirkan dan memahami asal mineralisasi supergen dan dapat menyebabkan penemuan mineralisasi tembaga sulfida hipogen. Berdasarkan hal tersebut, maka penting untuk dilakukan penelitian lebih mendalam tentang karakteristik alterasi dan mineralisasi bijih dari prospek ini, agar tipe genetiknya dapat diketahui. Terdefinisinya tipe genetik dan kadar bijih dari mineralisasi tembaga supergen ini menjadi hal penting sebagai panduan dalam mengeksplorasi endapan ini secara lebih detail.

Lokasi sekitar daerah penelitian terdapat indikasi adanya mineralisasi sulfida, yaitu di Kawasan Lappadata, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan, berdasarkan hasil publikasi oleh Nur, et.al, 2019 *Hydrothermal Alteration Associated with Vein-Type Sulphide Mineralization at Lappadata Prospect, South Sulawesi, Indonesia: A Preliminary Study*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa batuan induk dari mineralisasi tersebut adalah basal porfiritik dan batugamping anggota Formasi Salo Kalupang Eosen Awal hingga Oligosen Akhir. Kumpulan mineral alterasi hidrotermal termasuk kuarsa, klorit, muskovit, serisit, kalsit, aktinolit, epidot, ilit, kaolinit, dan pirit, yang umumnya dikategorikan dari propilitik terutama ditandai oleh klorit, kalsit dan epidot menjadi argilik yang ditandai dengan serisit dan ilit. Seluruh karakteristik alterasi hidrotermal, mineral bijih dan *gangue*, jenis mineralisasi, serta kisaran suhu pembentukan dan

komposisi fluida hidrotermal menunjukkan bahwa mineralisasi pada prospek Lappadata merupakan jenis epitermal.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Mineralisasi tembaga supergen ditemukan di Daerah Tonra, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan. Terdefinisinya tipe genetik dan kadar bijih dari mineralisasi tembaga supergen ini menjadi hal penting sebagai panduan dalam mengeksplorasi endapan ini secara lebih detail.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan umum penelitian ini yaitu untuk mengetahui tipe genetik dan kadar bijih dari mineralisasi tembaga supergen di daerah penelitian.

Tujuan Khusus:

1. Menganalisis tipe dan karakteristik mineralogi batuan *hostrock*.
2. Menganalisis tipe alterasi yang berasosiasi dengan mineralisasi tembaga supergen.
3. Menganalisis himpunan mineral bijih.
4. Menganalisis genesis mineralisasi berdasarkan karakteristik kimia unsur-unsur *trace element*, REE, dan kadar bijih pada mineralisasi tembaga supergen.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah secara teoritis bahwa dapat diketahui tipe genetik dan kadar bijih dari mineralisasi logam khususnya tembaga supergen dengan beberapa pendekatan-pendekatan yang dilakukan, dan data-data dari tipe mineralisasi sangat menentukan metode eksplorasi lanjut.

## **1.5 Peneliti Terdahulu**

Penelitian-penelitian terdahulu terkait mineralisasi logam dan kondisi geologi yang pernah dilakukan di sekitar daerah penelitian, antara lain :

1. Nur, et al., 2019. “*Hydrothermal Alteration Associated with Vein-Type Sulphide Mineralization at Lappadata Prospect, South Sulawesi, Indonesia: A Preliminary Study; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 676 (2019) 012033 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/676/1/012033*”, membahas tentang mineralisasi pada Daerah Lappadata merupakan jenis epitermal.
2. Sukamto, 1982. “Geologi Regional Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat, Sulawesi Selatan. Membahas tentangIndikasi mineralisasi yang didapatkan di daerah Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat ialah sebuah urat kuarsa yang mengandung sulfida tembaga dan malakit tersingkap pada intrusi diorit di dalam batuan klastik umur Teos kira-kira 30 km sebelah timurlaut Camba.
3. Utoyo, H., 2008. “Bijih besi di Daerah Bontocani Kabupaten Bone Sulawesi Selatan. Jurnal Sumber Daya Geologi (JSDG), 18, pp.309-317. Membahas tentang endapan besi tipe skarn di Bontocani Bone.
4. Widi, et al., 2007. “*Mineralization system of the iron ore deposits in bontocani district and its adjacent bone regency, south sulawesi province. Proceedings of HAGI-IAGI-IATMI Joint convention Bali 2007, 13-16 November 2007, p. 864-870.* Membahas tentang endapan besi tipe skarn di Bontocani Bone
5. Van Leeuwen, et al., 2010. Tectonostratigraphic evolution of Cenozoic marginal basin and continental margin successions in the Bone Mountains, Southwest Sulawesi, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 38(6), pp.233-254. Membahas tentang kumpulan formasi di Pegunungan Bone, Sulawesi Barat Daya secara keseluruhan.
6. Van Leeuwen, T. and Pieters, P.E., 2012. “*Mineral Deposits of Sulawesi. Geological Agency Publ. Ministry of Energy and Mineral Resourcwe MGEI-IAGI, Republic of Indonesia, Bandung.* Membahas tentang Sulawesi dapat dibagi menjadi tiga provinsi *geologis-metalogenik* ; Sulawesi Utara; porfiri Cu - Au ± Mo, *high-, intermediate-, and low-sulphidation* epitermal Au-Ag, intrusi metal-Au, skarn, dan mineralisasi

VMS, Sulawesi bagian Barat; mineralisasi porfiri Mo, porfiri Cu±Au, intrusi Au, intrusi metal±Au, dan VMS, Sulawesi Timur; mineralisasi emas yang pembawanya tidak diketahui.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Geologi Regional**

Geologi Regional Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat, Sulawesi Selatan meliputi Daerah Kabupaten Maros, Pangkep, Barru, Watansoppeng, Wajo, Watampone, Sinjai dan Kotamadya Parepare, semuanya termasuk Daerah Provinsi Sulawesi Selatan. Lembar peta berbatasan dengan Lembar Majene-Palopo di utara, Lembar Ujung Pandang, Benteng dan Sinjai di selatan, Selat Makasar di barat dan, Teluk Bone di timur (Sukamto, 1982).

##### 2.1.1 Geomorfologi

Di Daerah Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat terdapat dua baris pegunungan yang memanjang hampir sejajar pada arah utara-barat laut dan terpisahkan oleh lembah Sungai Walanae. Pegunungan yang barat menempati hampir setengah luas daerah, melebar di bagian selatan (50 km) dan menyempit di bagian utara (22 km). Puncak tertingginya 1694 m, sedangkan ketinggian rata-ratanya 1500 m. Pembentuknya sebagian besar batuan gunungapi, di lereng barat dan di beberapa tempat di lereng timur terdapat topografi *karst*, penceminan adanya batugamping. Di antara topografi *karst* di lereng barat terdapat daerah pebukitan yang dibentuk oleh batuan Pra-Tersier. Pegunungan ini di baratdaya dibatasi oleh dataran Pangkajene-Maros sebagai lanjutan dari dataran di selatannya.

##### 2.1.2 Stratigrafi

Kelompok batuan tua yang umurnya belum diketahui terdiri dari batuan ularabasa, batuan malihan dan batuan *melange*. Batuannya terbreksikan dan tergerus sentuhannya dengan formasi di sekitarnya berupa sesar atau ketidselarasan. Penarikan radiometri pada sekis yang menghasilkan 111 juta tahun kemungkinan menunjukkan peristiwa malihan akhir pada tektonik Zaman Kapur. Batuan tua ini tertindih tak selaras oleh endapan *flysch* Formasi Balangbaru dan

Formasi Marada yang tebalnya lebih dari 2000 m dan berumur Kapur Akhir. Kegiatan magma sudah mulai pada waktu itu dengan bukti adanya sisipan lava dalam *flysch*. Batuan gunungapi berumur Paleosen (58,5- 63,0 jt), dan diendapkan dalam lingkungan laut, menindih tak selaras batuan *flysch* yang berumur Kapur Akhir. Terobosan batuan beku yang terjadi di daerah itu semuanya berkaitan erat dengan kegiatan gunungapi tersebut. Bentuknya berupa *stok*, *sill*, bersusunan beraneka dari basal, andesit, trakit, diorit dan granodiorit dan berumur berkisar dari 8.3 sampai  $19 \pm 2$  juta tahun.

Formasi Salo Kalupang: batupasir, serpih dan batulempung berselingan dengan konglomerat gunungapi, breksi dan tufa bersisipan lava, batugamping dan napal, batulempung, serpih dan batupasir di beberapa tempat tercirikan oleh warna merah, coklat, kelabu dan hitam, mengandung fosil moluska dan foraminifera, terutama di dalam lapisan batugamping dan napal pada umumnya gampingan padat dan sebagian dengan urat kalsit, sebagian serpihnya sabakan, kebanyakan lapisan terlipat dengan kemiringan antara  $20^\circ$  -  $57^\circ$ . Penampang di Salo Kalupang memperlihatkan lebih banyak konglomerat di bagian barat, dengan komponen andesit dan basal. Di sebelah timur Palatae tersingkap lebih banyak tufa dan batupasir daripada di Salo Kalupang. Di timur Samaenre terdapat lebih banyak singkapan serpih daripada di tempat lain; batumannya berwarna coklat kemerahan dan kelabu berselingan dengan batugamping berlapis (Teol) dan batupasir.

Formasi Batuan Gunungapi Kalamiseng: lava dan breksi, dengan sisipan tufa, batupasir, batulempung dan napal; kebanyakan bersusunan basal dan sebagian andesit; kelabu tua hingga kelabu kehitaman, umumnya kebanyakan terubah, amidaloid dengan mineral sekunder karbonat dan silikat; sebagian lavanya menunjukkan struktur bantal. Satuan batuan ini tersingkap di sepanjang daerah pegunungan di timur lembah Walanae, terpisahkan oleh lajur sesar dari batuan sedimen dan karbonat yang berumur Eosen di bagian baratnya diterobos oleh retas dan stok basal, andesit dan diorit. Satuan batuan ini berumur lebih muda dari batugamping Eosen dan lebih tua dari Formasi Camba Miosen Tengah, mungkin Miosen Bawah; dan tebalnya tidak kurang dari 4.250 m.

## 2.2 Endapan Hidrotermal

Larutan hidrotermal adalah larutan panas dengan suhu 50°C sampai 500°C yang berasal dari sisa cairan magma dari dalam bumi yang bergerak ke atas dan kaya akan komponen-komponen (kation dan anion) pembentuk mineral bijih dan terbentuk pada tekanan yang tinggi (Pirajno, 2009).

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. Larutan hidrotermal erat kaitannya dengan aktivitas gunung api, baik aktif maupun yang baru saja aktif (*recently active*). Secara umum proses pembentukan *ore* atau mineralisasi bijih pada endapan jenis hidrotermal dipengaruhi oleh beberapa faktor pengontrol, meliputi (Pirajno, 2009):

1. Larutan hidrotermal yang berfungsi sebagai larutan pembawa mineral,
2. Zona lemah yang berfungsi sebagai saluran untuk melewati larutan hidrotermal,
3. 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*).

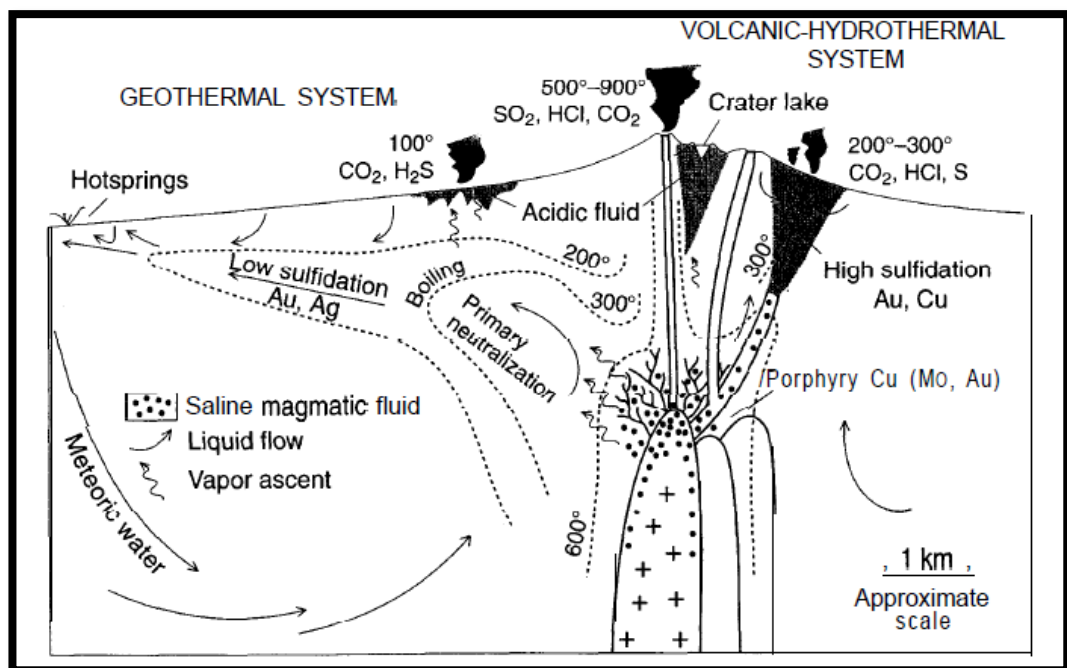
Endapan hidrotermal dicirikan dengan adanya endapan tipe urat atau *veintype deposit*, yang merupakan daerah tempat mineralisasi bijih terjadi dan membentuk tubuh yang diskordan (memotong tubuh batuan yang ada disekelilingnya).

## 2.3 Klasifikasi Endapan Hidrotermal

Endapan hidrotermal dibagi menjadi 4 (empat) tipe endapan antara lain (Maulana, 2017):

### 2.3.1 Endapan epitermal

Tipe endapan epitermal terbentuk berkaitan erat dengan aktivitas vulkanisme pada suatu daerah. Sistem epitermal ditandai dengan munculnya manifestasi aktivitas vulkanisme dangkal di atas permukaan bumi dalam bentuk *hot spring* (mata air panas) atau *fumarole*. Skema tipe endapan jenis ini dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut:



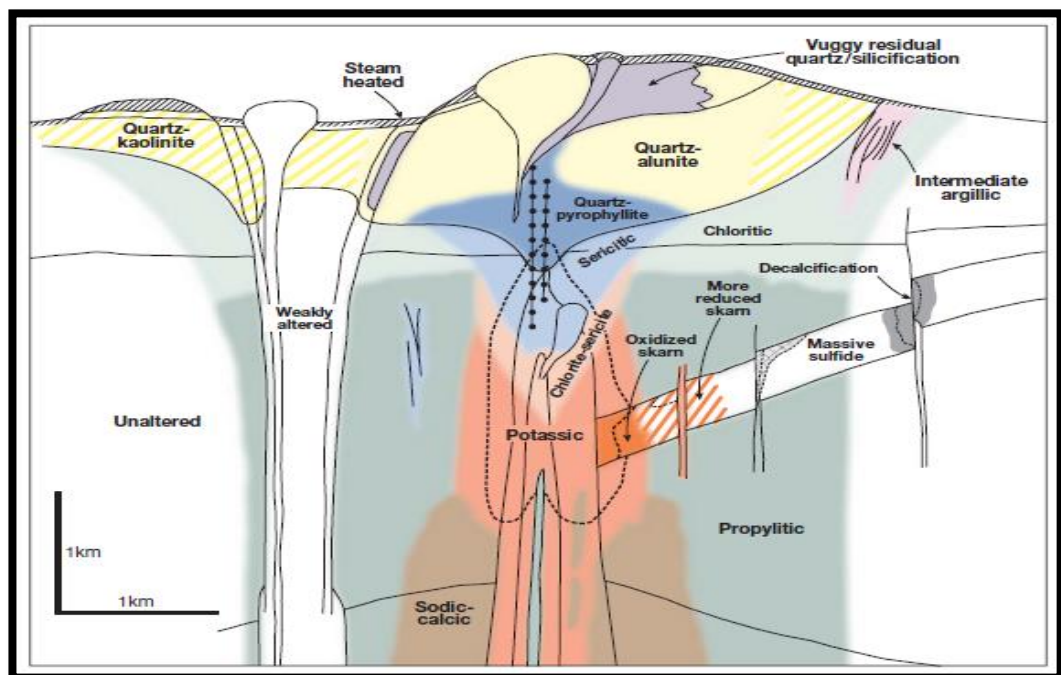
**Gambar 2.1** Skema tipe endapan epitermal. (Hedenquist & Lowenstern, 1994)

Proses pengendapan bijih pada lingkungan epitermal terjadi karena larutan pembawa bijih yang terfokus dan sedang bergerak naik ke permukaan, mengalami perubahan komposisi dengan cepat pada jarak 1 km dari sumbernya atau di permukaan, yang disebabkan oleh *boiling* (pendidihan), suatu proses yang paling memungkinkan untuk terjadinya presipitasi logam kompleks bisulfida seperti emas (Hedenquist *et al*, 2000). Secara umum, endapan epitermal terbagi atas dua tipe berdasarkan tingkat sulfidasinya atau tingkat oksidasi sulfur di dalam fluida bijihnya, yaitu endapan tipe *high sulfidation* (sulfidasi tinggi; HS) yang terbentuk pada sistem vulkanik-hidrotermal dan endapan tipe *low sulfidation* (sulfidasi rendah; LS) yang terbentuk pada sistem geotermal (Hedenquist *et al*, 2000).



### 2.3.2 Endapan pofiri (*Porphyry deposit*)

Endapan pofiri (*Porphyry deposit*) adalah jenis endapan hidrotermal yang mempunyai penyebaran luas dengan pola bijih yang menyebar dan mengandung konsentrasi bijih yang rendah dijumpai pada batuan beku dengan tekstur porfirik dengan komposisi asam sampai dengan menengah (Sillitoe, 2010). Skema bentuk tipe endapan porfiri dan mineralisasi serta pola alterasinya ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Pola zonasi alterasi-mineralisasi endapan tembaga porfiri (Sillitoe, 2010)

Endapan tipe porfiri merupakan endapan yang terbentuk akibat asosiasi antara larutan hidrotermal dengan aktivitas batuan beku intrusif yang mineral-mineral sulfida dan oksidanya terbentuk dari larutan hidrotermal pada suhu yang tinggi. Batuan intrusi umumnya bertekstur porfiritik dan sering berasosiasi dengan batuan vulkanik yang sejenis (Sillitoe, 2010).

### 2.3.3 Endapan skarn

*Skarn* adalah istilah yang digunakan untuk menjelaskan suatu batuan yang didominasi oleh mineral-mineral *Calc-silica* yang terbentuk oleh proses

pergantian atau *replacement* dari batuan yang bersifat karbonat. Proses terjadinya *skarn* melibatkan proses metamorfisme kontak yang *temperature* tinggi. Magma yang kaya akan *silica* mengintrusi batuan sedimen yang kaya akan karbonat seperti batugamping. Daerah atau zona yang dekat dengan intrusi tersebut akan mengalami proses pembakaran dan terjadi metamorfisme kontak yang selanjutnya akan terjadi penambahan unsur-unsur penyusun dari magma kedalam batugamping (metasomasisisme).

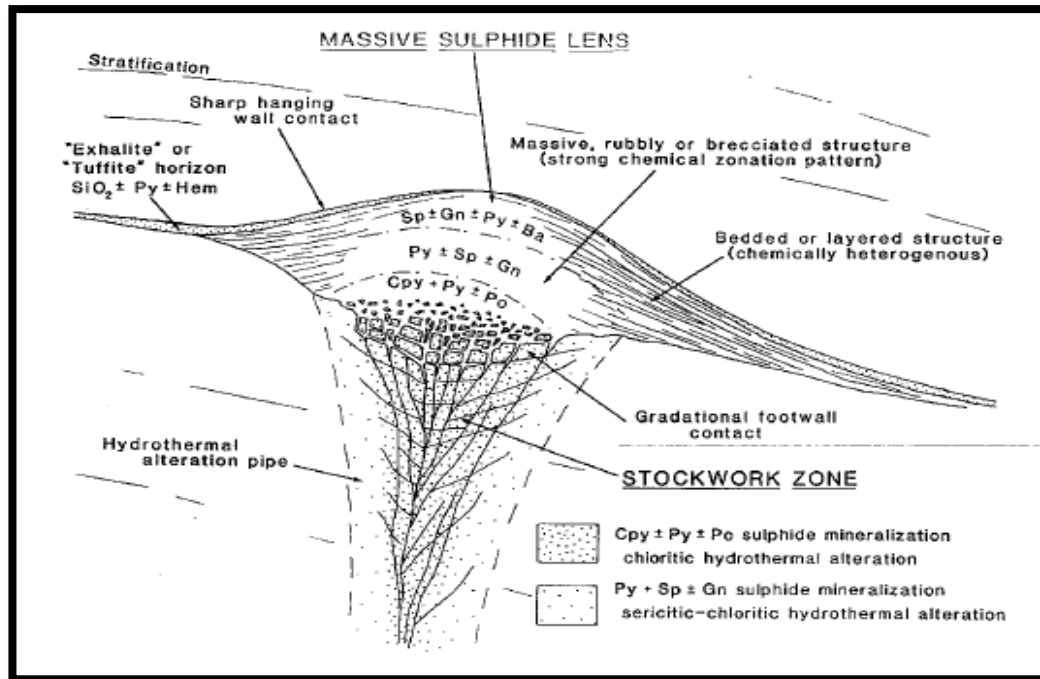
Skarn dapat dibagi berdasarkan beberapa kriteria diantaranya berdasarkan skala, batuan asal yang berubah, dan logam yang dikandungnya. Berdasarkan skala, endapan skarn dibagi menjadi 2 (dua) yaitu *reaction skarn* dan *replacement skarn*. Berdasarkan batuan asalnya (*protolith*) skarn dibagi menjadi exoskarn dan endoskarn (Maulana, 2017).

#### 2.3.4 Endapan Hidrotermal Bawah Laut (VMS)

Endapan VMS adalah kumpulan dari mineral-mineral sulfida dalam bentuk perlapisan (*stratiform*) yang dibentuk oleh hasil resipitasi larutan hidrotermal di permukaan atau di bawah lantai samudera. Proses sirkulasi dan pemanasan dari air laut terjadi pada kedalaman sekitar 2–8 kilometer pada kerak oseanik. Air laut yang terpanaskan tersebut kemudian mengalami proses *boiling* dan pemisahan fase, dengan ditandai berkembangnya lapisan *brine* di kerak oseanik. Hal ini berlangsung terus menerus selama rentang waktu ratusan bahkan ribuan tahun yang kemudian menghasilkan tubuh bijih sulfida *massive* yang luas (Maulana, 2017).

Jenis endapan ini merupakan salah satu sumber dari tembaga, zinc, perak dan emas. Klasifikasi endapan VMS dibuat oleh beberapa ahli yaitu Sawkins, 1990 dan Franklin, *et al*, 2005 dalam jurnal Taylor, 1986 membagi endapan VMS menjadi 3 jenis berdasarkan komposisi *host rock* yaitu *kuroko-type*; *cyprus-type*; dan *besshi-type*; endapan tipe ini dijumpai pada sedimen turbidit yang diintrusi oleh sill berkomposisi basalt umumnya mempunyai kandungan Cu yang tinggi dengan kandungan Zn yang relatif rendah. Menurut Franklin *et al*, 2005 endapan VMS dibagi berdasarkan litostratigrafinya menjadi 5 (lima) yaitu *Bimodal mafic*;

*Mafic dominated (back arc ophiolite); Siliclastic mafic; Bimodal felsic; dan Felsic siliclastic.* Adapun model skematik dari proses pembentukan endapan VMS pada Gambar 2.3 berikut.



**Gambar 2.3** Skematik ideal yang menggambarkan karakteristik dari endapan VMS (Taylor, 1986).

## 2.4 Endapan Sedimenter

Endapan sedimenter adalah tipe endapan mineral ekonomis yang terbentuk oleh proses sedimentasi termasuk presipitasi unsur-unsur tertentu pada suatu lingkungan sedimen tertentu, baik dengan atau tanpa bantuan dari organisme. Adapun endapan sedimenter termasuk *banded iron formation*, endapan placer (*placer deposit*), endapan evaporasi (*evaporate deposit*).

### 2.4.1 Endapan *Banded Iron Formation*

Adalah endapan mineral yang disusun oleh bantuan sedimen yang berlapis dan berbutir halus, terbentuk dari proses sedimentasi kimia yang disusun oleh perselingan kuarsa kristalin atau rijang (*chert*) dan mineral-mineral yang mengandung besi (Fe) dengan kandungan besi sekitar 30% (Maulana, 2017).

#### 2.4.2 Endapan *Placer Deposit* (endapan letakan)

*Placer deposit* atau endapan letakan merupakan endapan yang terbentuk dari hasil akumulasi dari mineral-mineral ekonomis yang berasal dari proses pemisahan secara gravitasi (*gravity separation*) selama proses sedimentasi (Stanaway, 2012) pada umumnya, endapan ini dapat dijumpai disepanjang aliran sungai, di pinggir pantai dan di dasar laut. Sebagai syarat untuk terakumulasi, partikel-partikel mineral harus lebih berat dan padat dari berat jenis kuarsa (berat jenis kuarsa=2.65) penguat kuarsa adalah komponen utama yang menyusun pasir dan kerikil.

#### 2.4.3 Endapan Evaporasi

Endapan evaporasi merupakan sumber utama dari garam dapur (*Rock Salt*), potash (K), kalium berat dan nitrat yang digunakan untuk kebutuhan pokok di dunia. Jenis endapan ini merupakan endapan presipitasi kimia yang terbentuk akibat proses evaporasi dari larutan yang berasal dari air laut (Evans, 1993).

### 2.5 Endapan Hasil Lapukan

Endapan hasil lapukan atau yang sering disebut dengan *weathering* atau *residual deposit* adalah endapan yang terbentuk akibat adanya proses pelapukan dari batuan yang mengandung bijih mineral yang ekonomis secara kimia yang tidak mengalami transportasi dan membentuk *soil* atau sering disebut dengan Laterit. Endapan ini dicirikan oleh melimpahnya unsur besi dan aluminium hidroksida karena kedua unsur ini juga terkadang mengandung endapan logam tertentu dengan *grade* yang tinggi.

*Laterite deposit* atau endapan laterit diartikan sebagai hasil dari proses pelapukan yang intensif di daerah *humid*, *warm* maupun *tropic* dan kaya akan mineral lempung yang bersifat *kaolinitic* serta Fe- dan Al- *oxide/hydroxide* (Schellman,1983;1994 dalam Maulana, 2017). Endapan laterit pada umumnya menampakkan bidang perlapisan yang baik sebagai hasil reaksi antara air hujan yang masuk ke dalam formasi dan kelembapan tanah yang naik ke atas

permukaan. Laterit merupakan sumber dari beberapa mineral ekonomis di antaranya *bauxite* dan nikel (Ni), mangan (Mn), tembaga (Cu), emas (Au) dan *platinum group element* (PGE). Klasifikasi endapan laterit terdiri dari Bauksit, Nikel laterit, dan Supergen *enrichment deposits* (Maulana, 2017).

## 2.6 Tembaga

Secara mineralogi, bijih tembaga dibagi menjadi 4 (empat) kelompok besar, yaitu:

1. Mineral tembaga murni
2. Mineral sulfida tembaga
3. Mineral oksida tembaga
4. Mineral tembaga kompleks

Mineral-mineral *gangue* bijih tembaga yang utama antara lain; kuarsa, kalsit, dolomit, siderit, rhodokrosit, barit, dan zeolite. Mineral yang mengandung tembaga terdapat sekitar 160 mineral, tetapi hanya 16 macam mineral yang penting seperti terlihat pada Tabel 2.1 berikut:

**Tabel 2.1** Mineral Bijih Tembaga Utama (Bateman, 1964)

Kolompok Mineral	Nama Mineral	Senyawa Kimia	% Cu
Kelompok Unsur	Tembaga Murni	Cu	100
Kelompok Sulfida	Kalkopirit	CuFeS <sub>2</sub>	34,5
	Bornit	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	63,3
	Kalkosit	Cu <sub>2</sub> S	79,8
	Kovelit	CuS	66,4
	Enargit	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>	48,3
	Tetrahidrit	Cu <sub>8</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>7</sub>	52,1
	Tennanit	Cu <sub>8</sub> As <sub>2</sub> S <sub>7</sub>	57
Kelompok Oksida	Kuprit	Cu <sub>2</sub> O	88,8
	Tenorit	CuO	79,6
Kelompok Senyawa Kompleks	Malakit	CuCO <sub>3</sub> Cu(OH) <sub>2</sub>	57,3
	Azurit	2CuCO <sub>3</sub> Cu(OH) <sub>2</sub>	55,1
	Chrysocolla	CuSiO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	36
	Antlerit	Cu <sub>3</sub> SO <sub>4</sub> (OH) <sub>4</sub>	54,2
	Brochantit	Cu <sub>4</sub> SO <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub>	56,2
	Atacamit	CuCl <sub>2</sub> ·3Cu(OH) <sub>2</sub>	59,4

Pada umumnya bijih tembaga yang berbentuk sulfida berasosiasi dengan monzonit kuarsa atau batuan yang sejenis dengannya dan jarang berasosiasi dengan intrusi yang bersifat basa. Sebagian besar endapan tembaga yang ditemukan merupakan cadangan besar berasal dari larutan hidrotermal dan proses penggantian, lebih dominan dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh proses pengisian celah-celah. Endapan yang terbentuk dari hasil metasomatik kontak dan yang langsung dipisahkan dari magma sangat sedikit dan hampir tidak berarti (Sukandarrumidi, 2016).

Salah satu contoh tambang tembaga yang mempunyai cadangan terbesar di dunia adalah tambang tembaga di Bingham, Uta, Amerika Serikat. Endapan tembaga ditempat ini berasal dari proses penggantian, merupakan tembaga porfiri ciri endapannya, bijih tembaga tersebar dan bervolume besar, berasosiasi dengan porfiri. Monzonit, kuarsa, dan porfiri diorit yang berumur Mesozoikum atau Tersier awal. Mineral sulfida primer terdiri dari pirit, kalkopirit, bornit, dengan sedikit sfalerit dan molibdenit. Kandungan kalkopirit (89%), kalkosit (9%), kovelit (7%), bornit (4%).

Penelitian endapan tembaga dilakukan dengan pemetaan geologi, *tunneling*, dan pemboran, sering pula di ikuti dengan penelitian geokimia. Penambangan dilakukan dengan cara tambang terbuka, apabila endapan bijih ditemukan tidak terlalu dalam, dapat juga dilakukan dengan penambangan dalam (*underground*) dengan membuat terowongan. Pengangkutan dengan menggunakan alat-alat berat. Investasi untuk usaha di industri pertambangan tembaga memerlukan biaya yang sangat besar. Oleh sebab itu, usaha pertambangan jenis ini hanya mampu dilaksanakan oleh perusahaan multi *international* (Sukandarrumidi, 2016).

## **2.7 Zona Supergen**

Selama berlangsung pengangkutan dan erosi suatu endapan bijih terekspos di dekat permukaan, kemudian mengalami proses pelapukan, pelindian (*leaching*), maupun oksidasi pada mineral-mineral bijih. Proses tersebut menyebabkan banyak unsur logam ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  dll) akan terlarut (umumnya sebagai

senyawa sulfat) dalam air yang bergerak ke dalam air tanah atau bahkan sampai kedalaman dimana proses oksidasi tidak berlangsung (Sukandarrumidi, 2016).

Proses oksidasi yang terjadi di bagian atas kulit bumi sangat ditentukan oleh keberadaan oksigen bebas. Oksigen ini berada di rongga-rongga, di celah-celah, di pori-pori batuan. Rongga-rongga dan sejenisnya ini terjadi sebagai akibat adanya tektonik lempeng, intrusi atau pengaruh pelapukan yang berjalan di permukaan secara menerus dan berkesinambungan. Makin tebal lapisan batuan yang lapuk, makin intensif pengaruh tektonik dan intrusi makin tinggi pula proses oksidasi terjadi. Kejadian secara alamiah yang berlangsung terus selama waktu geologi dibantu oleh keberadaan air tanah akan mengakibatkan proses oksidasi berjalan terus. Hal ini apabila berlangsung secara berkelanjutan akan mengakibatkan terjadinya pengkayaan logam di suatu zona tertentu dalam kulit bumi. Di zona ini logam terakumulasi sehingga layak untuk ditambang.

Daerah dimana terjadi proses oksidasi disebut sebagai zona oksidasi. Sebagian larutan yang mengandung logam-logam yang terlarut bergerak terus hingga di bawah muka air tanah, kemudian logam-logam tersebut mengendap kembali membentuk sulfida sekunder. Zona ini dikenal sebagai zona pengkayaan supergen terdapat daerah dimana mineralisasi primer tidak terpengaruhi oleh proses oksidasi maupun pelindian, yang disebut sebagai zona hipogen. Logam yang paling banyak terbentuk karena proses ini adalah tembaga (Cu) (Hartosuwarno, 2011).

## **2.8 Oksidasi dan Pengkayaan Supergen**

Endapan bahan galian yang telah tersingkap akan segera mengalami proses pelapukan oleh oksigen. Terutama endapan yang mengandung mineral sulfida, mineral tersebut akan mengalami oksidasi dan dilanjutkan proses pelarutan oleh air hujan. Mineral sulfida akan membentuk larutan asam ( $H_2SO_4$ ), yang akan bertindak sebagai larutan aktif terhadap mineral-mineral lainnya. Mineral bijih tersebut akan teroksidasi dan banyak bagian dari mineral bijih itu akan tercuci dan bersama dengan dengan air tanah akan merembes ke bawah, yaitu bersama

dengan air perkolasi sampai pada permukaan air tanah bahkan sampai pada kedalaman yang tidak terjangkau oleh oksidasi (Sukandarrumidi, 2016).

Bagian yang teroksidasi disebut sebagai zona oksidasi. Larutan yang merembes ke bawah, apabila sudah sampai pada permukaan air tanah akan mengendapkan kandungan mineral sulfida sekunder. Daerah tersebut dikenal sebagai daerah pengkayaan sulfida supergen atau daerah pengkayaan sekunder. Bagian deposit bijih di bagian bawah yang tidak terkena pengaruh oksidasi dan masih utuh disebut sebagai zona primer atau zona hipogen. Susunan zona supergen dan hipogen tersebut merupakan karakter endapan mineral bijih yang banyak mengalami proses pelapukan dalam jangka waktu yang cukup lama. Proses pengkayaan supergen ini menghasilkan endapan bijih tembaga dalam jumlah yang cukup untuk dapat ditambang (Sukandarrumidi, 2016). Proses yang terjadi dapat dipisahkan menjadi 3 (tiga) tahapan mulai dari permukaan tanah, yaitu:

1. Pertama, terjadi oksidasi dan pelarutan di zona oksidasi.
2. Kedua, terjadi pengendapan di zona oksidasi.
3. Ketiga, terbentuknya pengendapan sulfida supergen.

## **2.9 Oksidasi dan Pelarutan di Zona Oksidasi**

Pengaruh oksidasi terhadap mineral cukup jelas, yaitu mineral menjadi lapuk dan bagian logam mineral tercuci dan diangkut ke bawah bersama air pelarutnya atau membentuk senyawa baru. Tekstur akan teracak-acak, bijih sisa akan menjadi berongga-rongga. Limonit yang terbentuk menjadi warna karat besi pada singkapan yang dikenal dengan istilah *gossan*. Semua proses ini akibat kinerja oksigen dan karbon dioksida yang bersifat oksidatif. Apabila air mengandung *chloride*, air akan bereaksi dengan garam dan membentuk asam *chloride*, yang kemudian bereaksi dengan mineral tertentu dan menghasilkan cairan pelarut yang kuat seperti asam sulfat dan feri sulfat. Asam sulfat yang terbentuk akan bereaksi dengan garam dan membentuk senyawa baru yang oksidatif, yaitu feri *chloride*. Perubahan kimia yang terdapat di zona oksidasi ini adalah:



1. Terjadi oksidasi, pelarutan dan penghancuran mineral berharga.
2. Terjad perubahan mineral logam tersebut ke dalam bentuk senyawa yang teroksidir.

Senyawa logam yang teroksidasi di zona oksidasi dan terbawa dari zona oksidasi dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut:

**Tabel 2.2** Oksidasi dari senyawa logam (Sukandarrumidi, 2016)

Logam	Senyawa Primer	Larutan Penting Terbentuk	Senyawa Teroksidir di Zona Oksidasi	Terbawa/tidak dari Zona Oksidasi
Fe	Sulfida	Feri sulfat	Hematit, limonit, sulfat basa	Ya
	Karbonat Oksida	-	Limonit, ferihidroksida	Tidak
Cu	Sulfida	Sulfat tembaga	Ferihidroksida	Tidak
			Karbonat, oksida, silikat	Ya
Pb	Sulfida	Sulfat seng	Karbonat, oksida, silikat	Ya
Sn	Oksida, Sulfida	Feri sulfat asam + Cl	Oksida	Tidak
Al	Silikat	Sulfat nikel	Oksida, silikat	Tidak
Ag	Sulfida	Sulfat kobalt	Chlorida, iodida, bromida	Ya

Pada umumnya mineral-mineral sulfida lainnya akan bereaksi dengan feri sulfat dan membentuk sulfat-sulfat logam antara lain  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{AgSO}_4$ . Sulfat-sulfat logam tersebut semuanya mudah larut dan akan ikut merembes kebawah, yang kemudian diendapkan sebagai sulfida sekunder. *Gossan* atau batu tudung (*caprocks*), merupakan suatu hal yang penting untuk diperhatikan dalam eksplorasi mineral yaitu dengan melihat warnanya. Warna yang sering timbul dapat diperhatikan pada Tabel 2.3.

Warna *gossan* akan menunjukkan jenis logam yang terdapat:

1. Tembaga, warna *gossan* coklat, merah tua, merah hati, jingga.
2. Pirit, warna *gossan* kuning, merah bata.
3. Kalkopirit didalam goetit, warna *gossan* coklat tua dan coklat kekuningan.
4. Campuran goetit dan hematit yang merupakan karakter mineral bornit, warna *gossan* jingga hingga coklat.

5. Banyak hematit yang menunjukkan khas untuk kalkosit warna *gossan* merah tua hingga merah hati.

**Tabel 2.3** Warna khas dari logam yang teroksidasi (Sukandarrumidi, 2016)

Mineral dan logam	Warna lapuk	Senyawa teroksidasi
Sulfat besi	Kuning, coklat, merah, merah tua	Goetit, hematit, limonit
Mangan	Hitam	Oksida mangan
Tembaga	Hijau, biru	Karbonat, silikat, oksida, unsur sulfat
Kobalt	Hitam, merah cemerlang	Oksida
Nikel	Hijau	Garnierit
Molibdenit	Kuning cemerlang	Wulfenit, molibdenit
Perak	Kehijauan berserat	Klorit
Arsen	Jingga, kuning	Oksida
Bismut	Kuning	Bismuth
Kadmium (dlm.seng)	Kuning muda	Oksida kadmium

Kesimpulan yang diambil dari warna *gossan* saja tidak cukup, dan masih harus dikombinasi dengan struktur limonit yang terdapat. Limonit residual merupakan hasil oksidasi sulfida-sulfida, biasanya menunjukkan struktur khas berongga-rongga seperti rumah lebah. Untuk daerah wilayah penambangan yang sama dicirikan oleh bentuk rongga yang sama, hal ini akan mempermudah kerja geologist dalam mengidentifikasi kemungkinan didapatkannya jenis logam tertentu (Sukandarrumidi, 2016). Beberapa hal yang perlu diperhatikan berkaitan dengan kedalaman pengaruh oksidasi adalah:

1. Keadaan air tanah, air tanah pada umumnya tidak mengandung oksigen bebas, sehingga oksidasi praktis tidak akan terjadi. Pada umumnya muka air tanah dianggap sebagai batas pengaruh oksidasi karena oksidasi tidak ada, lingkungan air tanah justru bersifat reduksi. Pada musim hujan muka air tanah akan naik dan pada musim panas muka air tanah akan turun. Tempat terjadinya fluktuasi muka air tanah inilah yang akan banyak terpengaruh oksidasi.
2. Kondisi iklim, akan berpengaruh sepanjang waktu. Di daerah beriklim panas dan lembab kegiatan oksidasi akan terjadi lebih cepat, dibandingkan dengan di

daerah dingin. Hal tersebut merupakan salah satu penyebab, di daerah dingin *gossan* yang terbentuk akan lebih tipis dibandingkan di daerah panas.

3. Faktor waktu akan ikut berperan dalam proses oksidasi. Makin lama waktu oksidasi berlangsung, proses oksidasi akan berlangsung lebih sempurna.
4. Tingkat erosi, secara tidak langsung akan berpengaruh terhadap kedalaman muka air tanah. Adanya erosi akan memper dangkal muka air tanah sehingga zona oksidasi akan menjadi lebih sempit, dan bahkan mungkin akan hilang sama sekali, kemudian mengenai batuan di sekeliling jebakan bijih. Apabila mempunyai struktur yang tidak masif akan membantu jalannya oksidasi.

#### **2.10 Pengendapan Bijih di Zona Oksidasi**

Jenis mineral yang mempunyai nilai ekonomi tinggi sering di endapkan di bagian bawah zona oksidasi. Bijih yang ditemukan terdiri dari unsur unsur logam tembaga, seng, timbal, perak, vanadium, uranium, dalam bentuk senyawa senyawa karbonat, silikat, oksida ataupun dalam bentuk endapan logam murni (Sukandarrumidi, 2016). Berbagai proses yang dapat berlangsung secara sendiri atau bergabung, yaitu:

1. Proses penjuanan cairan yang Merembes ke bawah dan kemudian mengalami Evaporasi seperti yang dijumpai di daerah pertambangan tembaga terbesar di dunia. Mineral tembaga Yang terbentuk dengan cara ini adalah antlerit, kalkanit, dan krohnikit.
2. Proses oksidasi dan hidrasi yang menghasilkan oksida oksida hidrat besi, mangan, tembaga.
3. Proses terjadinya reaksi antara larutan itu sendiri akan menghasilkan kuprit dan tenorit, unsur tembaga, unsur perak.
4. Ada kemungkinan reaksi antara cairan dengan mineral gang ataupun dengan dinding jebakan bijih (*wall rocks*) yang terdiri dari batugamping dan akan menghasilkan mineral malakit, azurit, smithsonit, krisokola dan hemimorfit.

Ketentuan umum bahwa mineral yang dihadapi adalah mineral yang teroksidasi merupakan mineral bijih yang akan berubah sesuai dengan kedalaman,

perubahan berkaitan dengan kedalaman dan tidak mencapai ketebalan yang berarti (Sukandarrumidi, 2016).

### **2.11 Pengkayaan Sulfida Supergen**

Logam-logam yang terlarut dalam air tanah, karena gravitasi melalui rongga-rongga atau pori-pori batuan akan merembes ke bawah pada zona oksidasi. Tidak semua logam yang terlarut ini terperangkap dan diendapkan pada bagian bawah zona oksidasi, tetapi terus mengalir ke bawah mencapai daerah yang sedikit proses oksidasinya, yaitu di daerah di mana terdapat pertemuan dengan air tanah atau di daerah muka air tanah, dan di tempat ini akan diendapkan kembali dalam bentuk-bentuk sulfida sekunder. Apabila ditinjau lebih lanjut, logam-logam yang terlarut yang tidak terendapkan di daerah zona bagian atas, terus mengalir dan berkumpul di daerah bagian bawah akibatnya di daerah bagian bawah ini kandungan logamnya makin lama makin banyak atau mengalami pengkayaan. Daerah zona ini disebut sebagai zona sulfida supergen (Sukandarrumidi, 2016).

Zona oksidasi yang berada di daerah permukaan topografi dan daerah di bawahnya oleh kekuatan alam sedikit demi sedikit akan mengalami erosi. Akibatnya zona oksidasi menjadi semakin tipis, yang pada suatu saat mampu mencapai zona sulfida supergen. Akibat selanjutnya zona sulfida supergen ini juga akan mengalami oksidasi. Hal ini mengakibatkan logam yang berharga bersama dengan air akan merembes ke bawah, sehingga pengkayaan makin bertambah dan makin dalam. Dengan cara demikian bijih primer akan dapat diperkaya hingga berkali-kali atau boleh dikatakan menjadi 10 kalinya. Bijih yang sudah kaya, akan diperkaya lagi dan seterusnya, sehingga mineral yang semula kadar logamnya cukup rendah menjadi naik, dan *protore* atau mineral primer yang semula jumlahnya sedikit sehingga tidak bernilai lama kelamaan juga dapat mencapai kadar logam yang dikehendaki. Persyaratan yang harus dipenuhi supaya terjadi pengkayaan supergen antara lain:

1. Adanya proses oksidasi, memungkinkan terjadinya pengkayaan logam di tempat bagian bawah.

2. Cukup adanya mineral primer yang dapat menghasilkan larutan-larutan seperti mineral sulfida besi, pirit.
3. Terdapat daya meloloskan larutan yang terbentuk itu ke bawah melalui endapan bijih.
4. Tidak terjadi pengendapan di zona oksidasi yang akan menghambat perembesan air ke bawah.
5. Adanya zona bebas oksigen yang merupakan tempat pengendapan sulfida sekunder, dalam hal ini zona yang terletak di bawah muka air tanah.
6. Terdapatnya presipitasi di zona pengendapan ini seperti arsenida, sulfida, dan pengendapan hanya dimungkinkan dengan cara penggantian. Hal ini hanya mungkin terjadi, di mana suatu larutan sulfida logam akan dapat mengendap sebagai sulfida sekunder apabila terdapat sulfida lainnya.

Pencermatan yang dilakukan oleh Schurmann (dalam Parks dan Diamird, 1964), yang kemudian dikenal sebagai deret Schurmann memberikan urutan deret bijih pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Deret Bijih Schurmann (Sukandarrumidi, 2016)

No	Urutan Bijih	Rumus Kimia	Keterangan
1	Paladium	Pd	
2	Air raksa	Hg	
3	Perak	Ag	
4	Tembaga	Cu	
5	Bismuth	Bi	
6	Cadmium	Cd	
7	Stibium	Sb	
8	Timah	Sn	Daya larut (dari atas ke bawah sebagai sulfida makin meningkat)
9	Timbal	Pb	
10	Seng	Zn	
11	Nikel	Ni	
12	Kobalt	Co	
13	Besi	Fe	
14	Arsen	As	
15	Thalium	Tl	
16	Mangan	Mn	

Sulfat tembaga yang diendapkan berasal dari larutan sulfat tembaga yang mengganti galena, sfalerit, dan pirit. Ketiga mineral terakhir ini dalam deret Schurmann terletak dibawah tembaga. Dengan demikian suatu logam dalam larutan akan diendapkan sebagai sulfida karena adanya sulfida logam lain yang terletak dibawahnya (dalam deret Schurmann).

Hasil pengamatan lapangan yang dilakukan di tambang tembaga di Birmingham, Uta, Amerika Serikat, dicermati endapan tembaga yang terdiri dari mineral kalkosit dan kovelit terbukti dapat menggantikan bornit, tetrahidrit, kalkopirit, energit, galena, sfalerit, pirhotit, pirit dan titanium. Dalam hal ini, kalkosit merupakan mineral supergen yang umum, tetapi secara umum kovelit ternyata lebih dominan. Dengan demikian ada kecenderungan bahwa kovelit yang merupakan sulfida tembaga diendapkan apabila perbandingan antara feri terhadap fero relatif lebih tinggi. Kalkosit diendapkan apabila perbandingan besi menunjukkan sebaliknya, jadi kalkosit diganti kovelit supergen dan kovelit hipogen diganti oleh kalkosit supergen. Untuk mendapatkan Gambaran secara jelas dan lebih umum mengenai mineral-mineral bijih yang teroksidir, hipogen dan supergen ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Pada Tabel dibawah terlihat bahwa satu jenis logam dapat berasal dari berbagai macam mineral, disamping berbagai jenis logam dapat terbentuk secara hipogen, supergen atau oksidasi. Untuk menentukan hal tersebut harus didukung dengan data lapangan. Berdasarkan data lapangan tersebut dapat diketahui model pengkayaan yang selanjutnya sangat bermanfaat dalam pengembangan eksploitasi bahan galian baik logam maupun *non* logam (Sukandarrumidi, 2016).

**Tabel 2.5** Mineral Bijih Hipogen, Supergen, dan Oksidasi (Sukandarrumidi, 2016)

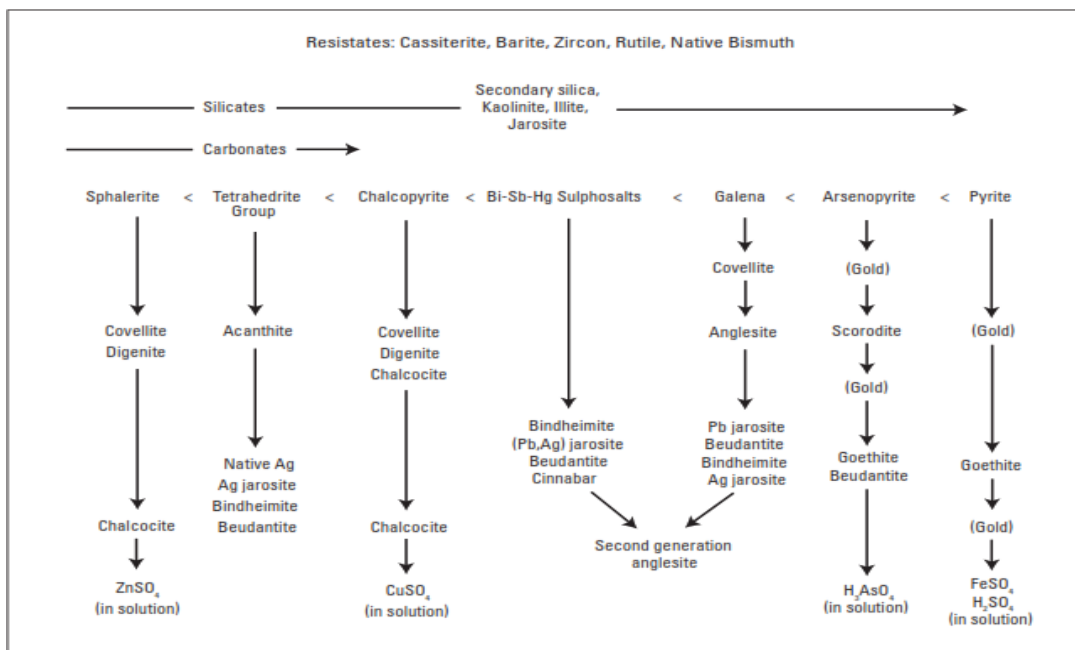
Logam	Umumnya Mineral Hypogene	Umumnya Mineral Supergen	Umumnya mineral-mineral berasal dari zona oksidasi
Perak	Tetrahidrit Tennatit	Unsur perak	Cerrargirit
		Argenit	Embolit
		Pirargirit	Bromirit
		Pirolusit	
		Stephanit	
		Polibasit	
		Pearcit	
Emas	Unsur emas	Unsur emas	Unsur emas
Seng	Sfalerit Willemit	Wurtzit	Smithsonit
			Hemimorfit
			Hidrozinkit
Timbal	Galena	-	Cerrusit
			Anglesit
			Piomorfit
			Leadhilit
Besi	Pirit Markasit Pyrhotit Arsenopirit Hematit Specularit Siderit	Markasit	Goetit
			Sulfat-sulfat besi
			Hematit
Mangan	Rhodokrosit Rhodonit Alabandit	-	-
Nikel	Milerit Pentlandit Nikolit	Bravoit	Carnierit

## 2.12 Karakteristik Bijih Supergen dan *Gangue*

Bijih supergen dan mineral *gangue* adalah produk reaksi antara mineral sulfida hipogen dan air meteorik asam yang turun, proses ini berlangsung di atau dekat permukaan tanah di lingkungan subaerial (Guilbert and Park, 1986). Dalam endapan VMS, tembaga dan logam lainnya dimobilisasi dari bijih sulfida masif primer dan diendapkan kembali di kedalaman. Pengendapan Cu sulfida dengan rasio Cu/S yang tinggi ini dapat menghasilkan pengayaan tembaga yang

signifikan secara ekonomis. Pengayaan supergen ditindih oleh *gossan* yang kaya oksida Fe yang telah diubah secara intens (sisa-sisa sulfida masif asli). Kumpulan mineral supergen sulfida didominasi oleh sekelompok kecil mineral kaya Cu: kalsit, bornit, kovelit, digenit, dan enargit. Dalam lapisan supergen, sulfida-sulfida ini dapat ditemukan berbagai jumlah sulfida hipogen yang terkait seperti pirit, *chalcopyrite*, dan sfalerit.

Perkembangan zona pengayaan supergen bersama dengan *gossan* di atasnya dalam endapan VMS menghasilkan urutan paragenetik yang berbeda berdasarkan mineralisasi supergen di banyak endapan yang ditemukan. Untuk tujuan ilustrasi, berikut Gambar diagram 2.4 yang disusun oleh Boyle, 2003, tahap awal perubahan, mineral *chalcopyrite*, sfalerit, dan tetrahedrit digantikan oleh kalkosit, digenit, kovelit, dan sulfida kaya Cu lainnya. Akantit dapat terbentuk di zona supergen karena perak dilepaskan dari tetrahedrit. Karena kondisi oksidasi meluas ke kedalaman yang lebih dalam, kovelit dan digenit akhirnya digantikan oleh kalkosit (Boyle, 2003 dalam Koski, 2013).



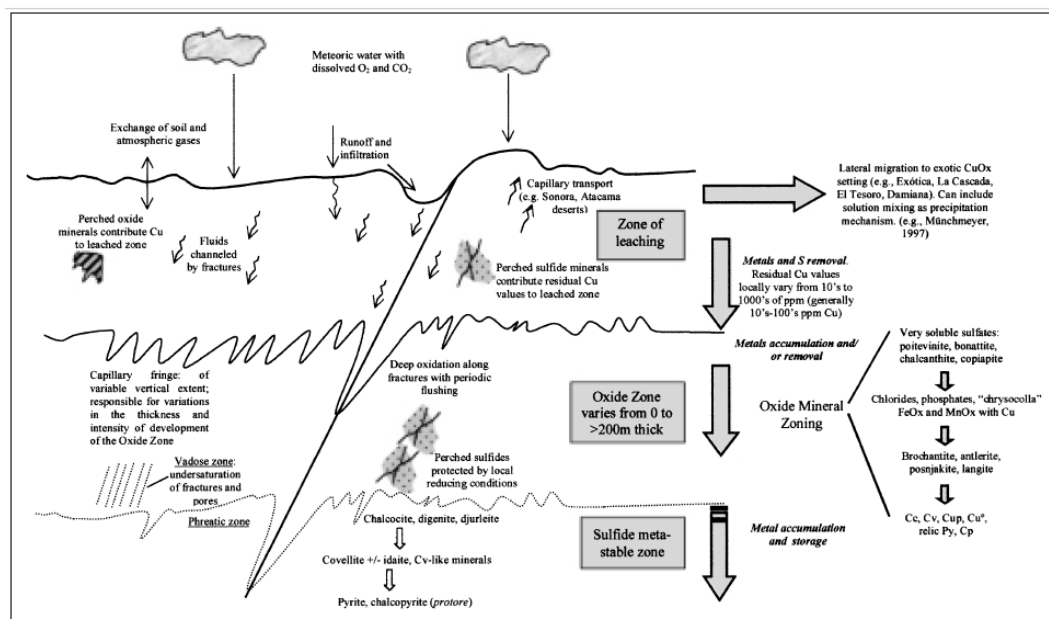
**Gambar 2.4** Urutan mineralisasi supergen diringkas dari endapan sulfida massif vulkanogenik di kamp pertambangan *Bathurst* (Boyle, 2003 dalam Koski, 2012)



Profil pelapukan dasar untuk endapan VMS berisi empat zona dari permukaan tanah asli ke bawah: (1) *capping* yang terlindung didominasi oleh oksida Fe, mineral lempung, dan kuarsa, (2) zona teroksidasi yang didominasi oleh sulfat sekunder, (3) zona pengayaan supergen dengan banyak kalkosit dan sulfida kaya Cu lainnya, dan (4) bagian atas sulfida masif yang mendasari. Pola zonasi yang lebih kompleks terlihat pada profil supergen matang yang dikembangkan pada endapan VMS, terutama endapan yang kaya akan Zn, Pb, dan As (Koski, 2012).

### 2.13 Lingkungan Pelapukan

Lingkungan pelapukan diketahui memiliki tiga wilayah utama. Masing-masing dicirikan oleh kondisi oksidasi dan pH yang berbeda. Ketiga wilayah ini adalah (1) wilayah sumber, terdiri dari volume batuan yang mengalami oksidasi dan kehilangan massa; (2) daerah sink (s), di mana massa dari daerah sumber terakumulasi dan yang mencakup mineral hipogen sisa (tidak bereaksi) dan (3) *protolith*, bahan yang pada dasarnya tidak bereaksi yang terdiri dari kumpulan mineral pra-oksidasi (Chavez, 2000). Skematis lingkungan pelapukan dari mineral pada tiga zona pelapukan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Diagram skematis yang menunjukkan lingkungan pelapukan dari mineral yang mengandung sulfida. Tiga zona komponen yang terdiri dari profil pelapukan yang disederhanakan (Chavez, 2000)

Mineralogi dari *source*, sink, dan *protolith* bervariasi berdasarkan apakah transpor massa dari daerah sumber ke daerah sink signifikan secara geokimia. Wilayah geokimia ini dirangkum dalam Tabel 2.6. Zona oksida tembaga yang berkembang dengan baik terbentuk melalui dua mekanisme yang berbeda: (1) melalui penambahan tembaga yang substansial ke volume yang teroksidasi, termasuk pembentukan endapan tembaga eksotis, dan (2) melalui oksidasi *in situ* dari sumber daya sulfida yang mengandung tembaga.

Untuk menghasilkan jenis oksida tembaga pertama, daerah sumber harus tersedia untuk memasok tembaga melalui oksidasi dan pencucian. Pirit adalah sumber paling signifikan dari S teroksidasi dan secara tidak langsung ion hydrogen dalam volume batuan yang mengandung sulfida yang mengalami pelapukan. Oksidasi pirit penting untuk menghasilkan deposit bijih tembaga oksida yang berkembang dengan baik melalui penambahan tembaga.

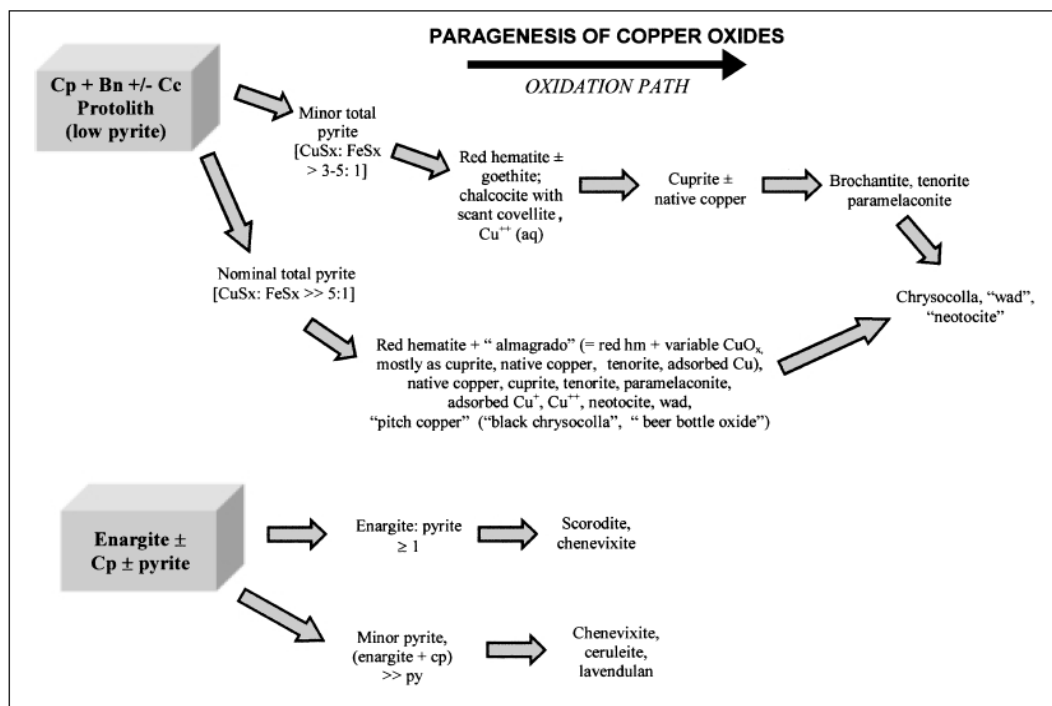
**Tabel 2.6** *Mineral Assemblages in Geochemical Domains in High and Low Mass Flux Conditions* (Sukandarrumidi, 2016)

Name	Dominantly Transported Fe and Cu	Dominantly In Situ Oxidation
Source	Reactive sulfides with jarosite, goethite, hematite; Residual pyrite, chalcopyrite; alunite, Al-Fe sulfates	Low total sulfide volumes of low S/metal sulfides Quasi-In situ oxidation and precipitation of hematite; hematite to goethite, jarosite
Sink	Chalcanite, bonattite, antlerite, brochantite, posnjakite; local native copper; chalcocite, covellite, pyrite, chalcopyrite; Also: alunite, As-Fe oxides, arsenates	Atacamite, brochantite, native copper, chalcosiderite, cuprite, tenorite, paramelaconite, malachite, phosphates; local alunite; residual chalcopyrite, bornite, pyrite.
Protolith	Pyrite, chalcopyrite; traces of bornite, pyrrhotite	Bornite, hypogene chalcocite, chalcopyrite, ± pyrite

## 2.14 Sumber Logam

Logam yang akhirnya terakumulasi di zona pengayaan oksida atau sulfida berasal dari volume batuan yang telah mengalami oksidasi dan penghilangan logam, disebut sebagai *leached capping* (dikembangkan dari sulfida yang

disebarluaskan dan dikendalikan oleh rekahan; Locke, 1926 dalam Chavez, 2000) atau gossan (dikembangkan dari badan sulfida masif, termasuk sulfida yang diinangi skarn). Meskipun penghilangan logam dari *capping* terlindi mungkin sangat efisien, sisa tembaga dan besi selalu ada dalam jumlah yang dapat dideteksi dan terdiri dari anomali geokimia baik positif maupun negatif penting untuk eksplorasi mineral dan pertimbangan lingkungan pembuangan batuan sisa. Gambar 2.6 menunjukkan paragenesis umum untuk fase tembaga yang terkait dengan kumpulan *protolith* sulfida yang berbeda untuk *protolith* yang relatif reaktif (Chavez, 2000).



**Gambar 2.6** Diagram jalur oksidasi menunjukkan paragenesis oksida tembaga yang berasal dari *protolith* pirit total rendah hingga sedang. Perhatikan bahwa paragenesis akhir, yang dikembangkan di zona oksida tembaga yang matang secara geokimia, terdiri dari serangkaian oksida Cu + Fe ± Mn, yang didominasi oleh hematit (Chavez, 2000)

## 2.15 Paragenesis Dan Zonasi Tembaga Oksida

Urutan paragenetik mineral tembaga oksida yang diamati dari banyak badan bijih yang mengandung tembaga teroksidasi mengungkapkan bahwa

serangkaian spesifik perubahan mineralogi progresif terjadi selama oksidasi supergen, transportasi dan presipitasi. Pirit jarang menunjukkan penggantian langsung oleh oksida tembaga karena lingkungan mikro yang dikembangkan oleh oksidasi pirit biasanya sangat asam sehingga hanya tembaga sulfat dan rangkaian besi sulfat yang mengikutinya, seperti jarosit, *coquimbite*, *copiapite*, *melanterite*, dan *voltaite* yang stabil. Misalnya, jika kandungan pirit sedemikian rupa sehingga kapasitas penetralan batuan induk terlampaui dan pH larutan  $<2$  dihasilkan, mineral tembaga sulfat *bonattite*, *chalcanthite*, *krohnkite* dan *wroewulfite* stabil.

Mineral-mineral ini terbentuk di bagian paling atas dari sistem oksidasi, secara topografis di atas sulfat pH-stabil yang mendekati netral seperti *brochantite*, *posnjakite*, dan *antlerite*. Kalkosit dan digenit adalah produk pengganti yang paling umum di bagian atas zona pengayaan sulfida, dengan kovellit pada kedalaman yang lebih dalam (Flores, 1985 dalam Chavez, 2000) *djurleite* adalah supergen tembaga sulfida yang paling melimpah di beberapa deposit bijih, Namun, penggantian kalkosit dan digenit secara berurutan sering terjadi ketika komposisi larutan supergen teroksidasi berubah saat pirit terdapat di daerah sumber.

Malakit dan azurit adalah konstituen umum dari zona oksida tembaga di mana karbonat tersedia dari sumber sedimen (terutama dalam sistem skarn teroksidasi, karbonat, bersama dengan *chrysocolla* mineraloid, umumnya terdiri dari mineral akhir paragenetik, menggantikan oksida dan sulfida sebelumnya dan terjadi sebagai konstituen yang diangkut yang menempati rekahan, termasuk rekahan yang tidak menunjukkan bukti mineralisasi sebelumnya (misalnya, batholit pesisir selatan Perú) (Chavez, 2000).

## **2.16 Implikasi Eksplorasi**

Eksplorasi saat ini untuk deposit bijih tembaga mendukung target oksida karena teknologi pelindian yang dikembangkan untuk pemulihan logam mengizinkan penambangan bahan dengan kadar yang relatif rendah. Akibatnya, pengetahuan tentang zonasi mineral dan komposisi mineralogi deposit oksida tembaga penting dalam eksplorasi dan evaluasi ekonomi dari sistem ini.

Tergantung pada distribusi rekahan dalam massa batuan induk. Zona oksida tembaga asli, yang dihasilkan melalui oksidasi *in situ* dari batuan yang mengandung sulfida, biasanya dikembangkan sehingga oksida tembaga yang paling tereduksi (tembaga asli dan kuprit) terbentuk di bagian bawah kolom oksida, di atas dan menggantikan tembaga supergen sulfida.

Prospek oksida tembaga kemudian dapat dievaluasi potensinya kumpulan mineral bijih target. Misalnya, dalam eksplorasi untuk *tonase* besar, endapan kadar rendah, oksida tembaga hijau adalah target yang lebih disukai secara metalurgi daripada kumpulan mineral tembaga asli-kuprit. Eksplorasi untuk borkantit-antlerit-krisokola akan menargetkan bagian tengah zona oksida tembaga yang berkembang dengan baik atau bagian atas profil pelapukan yang hanya menunjukkan perkembangan yang baru mulai.

Studi metalurgi akan menentukan bagian mana dari kumpulan oksida tembaga, jika ada yang dapat diekstraksi secara ekonomis dan reaktivitas batuan induk tinggi. Memahami asal usul mineral tembaga oksida berguna dalam mengarahkan upaya remediasi tambang dan pemulihan akhir tembaga dari limbah tambang (Chavez, 2000).