



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



**KONSTRUKSI MODEL DESKRIPTIF
DAN MODEL GENETIK ENDAPAN
BAHAN GALIAN SERTA IMPLEMENTASINYA
DALAM PERTAMBANGAN**

Profesor Syafrizal

**Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
27 Januari 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**KONSTRUKSI MODEL DESKRIPTIF DAN
MODEL GENETIK ENDAPAN BAHAN
GALIAN SERTA IMPLEMENTASINYA
DALAM PERTAMBANGAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

KONSTRUKSI MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN BAHAN GALIAN SERTA IMPLEMENTASINYA DALAM PERTAMBANGAN

Prof. Syafrizal

27 Januari 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

KONSTRUKSI MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN BAHAN GALIAN SERTA IMPLEMENTASINYA DALAM PERTAMBANGAN

Penulis : Prof. Syafrizal

Reviewer : Prof. Komang Anggayana

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-386-2

e-ISBN : 978-623-297-387-9 (PDF)

ITB PRESS

© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Alhamdulillah, penulis ucapkan karena atas berkat dan rahmat Allah Subhanahu wa Ta'ala, naskah Orasi Ilmiah ini bisa diselesaikan dengan baik, yang mana berisi rekam jejak keilmuan penulis tentang karya-karya yang telah, sedang, serta akan dikerjakan untuk pengembangan selanjutnya. Naskah Orasi Ilmiah ini diberi judul “Konstruksi Model Deskriptif dan Model Genetik Endapan Bahan Galian serta Implementasinya dalam Pertambangan”.

Indonesia sebagai negara kepulauan yang terletak di kawasan Asia Tenggara, memiliki kondisi geologi yang unik sehingga memiliki kekayaan alam yang melimpah dan beragam. Salah satu aset penting Indonesia adalah potensi bahan galian yang banyak terdapat hampir di semua pulau yang tersebar di Indonesia, terutama mineral dan batubara.

Indonesia memiliki potensi bahan galian atau bahan tambang (mineral dan batubara) yang cukup beragam. Khusus pada potensi mineral, Indonesia memiliki potensi mineral pembawa logam-logam seperti logam mulia (emas dan perak), logam dasar (tembaga, seng, timbal, besi, aluminium, nikel, timah), serta logam-logam lain yang diperkirakan (diduga) terdapat seperti titanium, zircon, logam tanah jarang (*rare earth element*), serta potensi bahan galian non-logam yang dibutuhkan industri seperti batugamping, bentonit, zeolit, kaolin, pasir kuarsa (pasir silika), dan lain-lain. Keberadaan endapan pembawa logam-logam tersebut di atas dapat berdiri sendiri ataupun merupakan endapan asosiasinya. Variasi-variasi keterdapatan bahan galian ini menjadi tantangan khusus untuk memahaminya, sehingga perlu dinyatakan dalam bentuk penyajian yang sederhana dan mudah dimengerti berupa model endapan, dapat berupa model deskriptif, model genetik, model endapan, model sumberdaya, hingga model cadangan.

Model deskriptif dan model genetik adalah cara penyajian keterdapatan bahan galian di alam menjadi model yang dapat dipahami dengan cepat sehingga selanjutnya dapat diimplementasikan untuk bidang pertambangan baik di tahap eksplorasi untuk perencanaan dan desain eksplorasi, tahap penambangan untuk perencanaan dan optimasi sumberdaya dan cadangan,

serta di tahap pengolahan untuk mendapatkan parameter ekstraksi maupun pemurnian.

Penulis berharap bahwa naskah Orasi Ilmiah ini dapat menjadi bahan inspirasi untuk mendapatkan ide-ide bagi para peneliti, akademisi, mahasiswa, dan praktisi sehubungan dengan bidang ini.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh tim peneliti dan pihak yang telah memberikan kontribusi, dukungan, serta inspirasi selama penulisan naskah Orasi Ilmiah ini, sehingga naskah ini dapat terwujud.

Bandung, 27 Januari 2024

Prof. Syafrizal

SINOPSIS

Logam dan produk mineral lainnya sangat penting bagi masyarakat modern, baik untuk kebutuhan kehidupan sehari-hari, seperti media transportasi dan media komunikasi. Sumber mineral-mineral pembawa logam berasal dari cebakan (endapan) bijih yang harus selalu disertai dengan penemuan baru untuk dapat menggantikan cebakan (endapan) bijih yang telah habis, dengan demikian diharapkan penemuan endapan baru selalu didorong dan didukung minimal didukung dengan pengembangan konsep-konsep baru dengan melakukan deliniasi kementerian cebakan (endapan) eksisting yang diusahakan.

Terminologi "deposit (endapan) bijih" memiliki arti khusus dalam banyak literatur di bidang geologi, yaitu "suatu massa batuan yang mengandung unsur, senyawa, atau mineral yang berharga dengan kadar dan jumlah total tertentu sehingga bahan tersebut dapat ditambang secara ekonomis". Endapan bijih merupakan bagian penting dari istilah "deposit (endapan) mineral" yang lebih luas, yaitu mencakup konsentrasi unsur atau mineral secara alami.

Mengingat kompleksitas suatu endapan bijih yang sangat bervariasi dan sangat lebar secara geologi, maka perlu disusun suatu bentuk penyampaian yang sederhana berupa model. Pemodelan endapan didefinisikan sebagai proses penyusunan secara sistematis semua informasi yang diketahui mengenai karakteristik dan lingkungannya, dengan tujuan untuk mendefinisikan dan menjelaskan fitur-fitur pentingnya berupa fitur geologi, fitur fisik, serta fitur kimiawinya. Pemodelan endapan mineral biasanya selalu terkait dengan konsep dasar seperti jenis (tipe) endapan beserta proses pembentukannya. Pemodelan endapan mineral mencerminkan keseluruhan analisis dari beberapa elemen (aspek) mendeskripsikan dan mengkuantifikasi endapan, seperti studi alterasi, mineralogi, inklusi fluida dan isotop stabil, serta observasi langsung di lapangan.

Secara umum, model memiliki dua persyaratan: (1) harus terbuka sehingga informasi baru tentang endapan dapat ditambahkan di masa depan, dan (2) pengguna harus dapat dengan mudah menemukan model-model yang sesuai. Proses penyusunan model bermula dari karakteristik geologi endapan,

berupa informasi-informasi yang dapat digunakan sebagai panduan untuk eksplorasi. Secara umum, pemodelan endapan ini dapat dimulai dari model deskripsi, lalu diterjemahkan lebih lanjut menjadi model genetik dan model endapan. Setelah model endapan terbentuk, maka dianalisis lanjut dengan mempertimbangkan prospek teknis dan ekonomis, sehingga terbentuk model sumberdaya dan model cadangan.

Secara umum, pembentukan endapan bahan galian di kerak bumi dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) yang utama, yaitu pembentukan endapan primer dan pembentukan endapan sekunder. Pembentukan endapan primer adalah endapan-endapan yang terbentuk akibat dari interaksi fluida-fluida yang berasal dari bawah permukaan bumi atau pembentukan endapan-endapan yang berhubungan langsung dengan magma. Pembentukan endapan sekunder adalah endapan-endapan yang terbentuk akibat dari perombakan, pengendapan kembali, serta pengkayaan dari endapan yang telah ada (terbentuk) sebelumnya.

Berdasarkan banyak literatur yang tersedia hingga saat ini, diyakini bahwa sebagian besar potensi logam dasar (Cu – Pb – Zn) dan logam mulia (Au – Ag) di Indonesia berasal (bersumber) dari endapan yang tergolong pada Endapan Sistem Hidrotermal. Pada lingkup keilmuan genesa bahan galian, sistem mineralisasi hidrotermal merupakan suatu sistem pembentukan endapan mineral yang berasal dari pergerakan fluida yang relatif panas pada kerak bumi. Mirip dengan kondisi umum pembentukan endapan, mineralisasi pada sistem hidrotermal sedikitnya memiliki 3 (tiga) komponen (syarat) utama yang harus terpenuhi, yaitu adanya sumber fluida, tersedianya media aliran fluida, serta adanya media perangkap (lingkungan) pengendapan yang memungkinkan mineralisasi terkonsentrasi. Berdasarkan interaksi fluida, temperatur pembentukan, lingkungan pembentukan, serta mekanisme aliran fluida, maka pada sistem endapan hidrotermal secara sederhana dapat dikelompokkan menjadi endapan porfiri, endapan *epithermal high sulphidation*, dan *endapan epithermal low sulphidation*. Pada ilustrasi tersebut dapat dilihat bagaimana interaksi fluida magmatik dengan air meteorik yang menyebabkan adanya gradien thermal, posisi relatif, serta kondisi larutan (fluida asam, mendekati netral, dan *saline*).

Model endapan mineral (bijih) deposit Pongkor di Leuwiliang Bogor Jawa Barat disajikan berdasarkan data yang tersedia dan karakteristik dari data-

data yang diperoleh dari sistem urat seperti urat Ciurug, Cikoret, dan Ciurug Utara. Model genetik dari vein Ciurug-Cikoret dikembangkan dari studi alterasi, tekstur dan mineralogi vein, kumpulan *precious metal* dan *base metal*, suhu dan komposisi fluida hidrotermal, serta mekanisme hadirnya *base metal* berdasarkan mikrotermometri dan studi isotop stabil, dan juga posisi pembentukan mineralisasi berupa urat (*vein*) relatif terhadap paleo-muka air tanah. Model endapan bijih pada skala deposit (endapan Pongkor), dari kompilasi data Ciurug-Cikoret dan data sebelumnya tentang endapan Pongkor. Data paling relevan dari penelitian ini dan dari peneliti sebelumnya disederhanakan dan digeneralisir. Dengan demikian, karakteristik khusus atau kecenderungan data akan ditunjukkan sebagai panduan untuk tujuan lain (eksplorasi, aspek teknis, atau perencanaan tambang).

Model endapan prospek emas Poboya yang terletak sekitar 12 km di sebelah timur laut Kota Palu terdiri atas tiga zona urat, yaitu River Reef Zone/RRZ, Hill Reef Zone 1/ HRZ-1, dan Hill Reef Zone 2/HRZ-2. Model deskriptif dan model genetik disajikan berdasarkan data-data penelitian ilmiah yang telah dilakukan. Dengan adanya beberapa indikasi keterdapatannya endapan emas *placer* (aluvial) di sepanjang *transcurrent* (sistem sesar dengan pergerakan lateral atau horizontal antara dua blok) PKFZ (Poboya Komplek Fault Zone) yang berfungsi sebagai jalur fluida hidrotermal dan adanya deposit RRZ mengimplikasikan bahwa daerah di sekitar PKFZ merupakan daerah yang potensial untuk dieksplorasi sebagai deposit epitermal.

Endapan Dairi Zn + Pb + Ag (Endapan Sopokomil) di Sumatra Utara merupakan satu-satunya tipe endapan SEDEX (Sedimen Exhalatif) hingga saat ini yang telah ditemukan di Sumatra atau Indonesia. Endapan sedimen ekshalasi (SEDEX) dianggap sebagai salah satu sumber Zn dan Pb yang paling penting. Secara umum, rata-rata endapan SEDEX mengandung 6,8 wt% Zn, 3,3 wt% Pb, dan 63 g/t Ag.

Rare Earth Element (REE), yang diterjemahkan menjadi unsur logam tanah jarang (LTJ) adalah 17 unsur yang menyusun sistem periodik yang jarang ditemukan di alam. Unsur ini tersusun atas Scandium (Sc)-Yttrium (Y) dan 15 unsur lain dari grup lantanida, secara berturut-turut: Lanthanum (La)-Cerium (Ce)- Praseodymium (Pr)-Neodymium (Nd)- Promethium (Pm)-Samarium (Sm)-Europium (Eu)-Gadolinium (Gd)-Terbium (Tb)- Dysprosium (Dy)-Holmium (Ho)-Erbium (Er)- Thulium (Tm)-Ytterbium (Yb)-Lutetium (Lu).

Keberadaan endapan REE dan unsur radioaktif dapat berupa endapan primer sebagai hasil proses magmatik maupun hidrotermal dan banyak juga dijumpai sebagai endapan sekunder dalam bentuk rombakan sedimentasi (*placer*) dan produk pelapukan (*lateritik*). Penyebaran REE dan unsur radioaktif di Indonesia banyak ditemukan berasosiasi dengan batuan granit yang terdapat di sepanjang jalur timah (Sumatra bagian barat, Bangka-Belitung), Kalimantan bagian barat, dan Sulawesi bagian barat.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xx
1. PENDAHULUAN	1
2. PEMODELAN ENDAPAN (<i>DEPOSIT MODELLING</i>)	3
2.1 Model Deskripsi.....	5
2.2 Model Genetik	5
2.3 Model Endapan.....	6
2.4 Model Sumberdaya	7
2.5 Model Cadangan	8
3. PEMBENTUKAN ENDAPAN BAHAN GALIAN	9
3.1 Pembentukan Endapan Primer.....	9
3.2 Pembentukan Endapan Sekunder	11
4. SISTEM ENDAPAN HIDROTERMAL	14
4.1 Endapan Hidrotermal.....	14
4.2 Interaksi Fluida Hidrotermal.....	16
5. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN EMAS – PERAK EPITHERMAL GUNUNG PONGKOR	18
5.1 Ringkasan Karakteristik dan Model Deskriptif Endapan Epitermal Pongkor	19
5.2 Model Deskriptif dan Model Genetik Endapan Au-Ag Pongkor	32
5.3 Implikasi Terhadap Eksplorasi	36
6. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK PROSPEK EMAS-PERAK POBOYA – PALU.....	38
6.1 Deskripsi Prospek Poboya	39
6.2 Implikasi Terhadap Eksplorasi	42
7. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN SENG – TIMBAL PROSPEK SOPOKOMIL	44
7.1 Deskripsi Endapan Zn-Pb Sopokomil.....	44
7.2 Konsep Model Genetik Endapan Zn-Pb Sopokamil.....	47
8. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN <i>RARE EARTH ELEMENT</i> DI INDONESIA	49
8.1 Manfaat Unsur Tanah Jarang.....	49
8.2 Keterdapatan REE	51

8.3	Implikasi terhadap Eksplorasi.....	58
9	UCAPAN TERIMA KASIH	59
	DAFTAR PUSTAKA	61
	CURRICULUM VITAE	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Contoh model endapan emas dengan sistim urat. (a) Bentuk endapan dihasilkan melalui korelasi lubang bor. (b) Bentuk endapan berupa urat yang ditentukan melalui nilai kadar dari hasil pengeboran. (Sumber : Syafrizal, koleksi pribadi).....	6
Gambar 2	Contoh model sumberdaya. (Sumber: https://newagemetals.com/mineral-exploration-a-short-guide-to-understanding-the-process/)	7
Gambar 3	Contoh model cadangan dengan sistem tambang terbuka (Sumber: GSGS MINERALS SERVICES – T3 SGS 849 - 09-2013).	8
Gambar 4	Sketsa yang memperlihatkan model pembentukan endapan primer (Sumber: Totok Darijanto & Syafrizal, koleksi pribadi).....	10
Gambar 5	(a-b) Sketsa yang memperlihatkan interaksi fluida yang terjadi pada pembentukan endapan primer (Syafrizal 2023, dikompilasi dan digambar dari berbagai sumber).	11
Gambar 6	Sketsa yang memperlihatkan pembentukan endapan sedimenter – plaser (Syafrizal 2023, dikompilasi dan digambar dari berbagai sumber).....	11
Gambar 7	Sketsa yang memperlihatkan pembentukan endapan laterit (Syafrizal 2023, dikompilasi dan digambar dari berbagai sumber).....	12
Gambar 8	Busur Magmatik dan Lokasi Endapan Cu-Au Utama Indonesia (Sumber: Garwin dkk., 2005).	14
Gambar 9	Ilustrasi yang memperlihatkan mekanisme pembentukan fluida hidrotermal serta asal logam (Sumber: Hedenquist & Lowenstern, 1994).	15
Gambar 10	Skema sistem hidrotermal yang memperlihatkan posisi relatif endapan porfiri, endapan <i>epithermal high sulphidation</i> , dan endapan <i>epithermal low sulphidation</i> (Sumber: Hedenquist & Lowenstern, 1994).	16

Gambar 11	(a) Lokasi Endapan Pongkor Au-Ag relatif terhadap busur magmatik Sunda Banda, dan (b) relatif terhadap endapan emas epithermal di Jawa Barat (Dimodifikasi dari Milesi dkk., 1999).	20
Gambar 12	Skema penampang melintang yang menunjukkan lingkungan geologi dari endapan Pongkor di Kubah Bayah (dimodifikasi dari Carlile dan Mitchell, 1994).	21
Gambar 13	Penampang SW-NE yang menunjukkan sistem vein pada endapan Pongkor (dimodifikasi dari Basuki dkk., 1994; Milesi dkk., 1999).	21
Gambar 14	Foto yang memperlihatkan representatif tekstur urat dan tahapan pembentukan vein (urat) dan mineraliasi. (a) Tekstur <i>banded</i> dan <i>colloform</i> urat <i>quartz-calcite</i> (CQ-facies) dengan sedikit mengandung <i>rhodochrosite</i> dan <i>ancherite</i> , umumnya kandungan mineral sulfida rendah. (b) Lapisan tipis <i>rhodochrosite</i> yang berwarna pink (MCQ facies) terdapat bersama-sama CQ-facies. (c) Mikrokristalin <i>milky quartz</i> dengan tekstur <i>banded</i> , <i>colloform</i> dan <i>massive</i> (BMQ facies), umumnya selalu mengandung mineral sulfida. (d) <i>Quartz</i> vein dengan tekstur <i>massive</i> , <i>banded</i> , <i>colloform</i> dan <i>breccia</i> serta kaya dengan lempung (BMQ-GSQ facies); mengandung <i>disseminated</i> dan <i>thin-band</i> mineral sulfida. (e) <i>Massive quartz</i> dengan <i>disseminated sulfide</i> (BMQ facies). (f). <i>Massive quartz</i> dan breksia, mengandung <i>disseminated quartz</i> sepanjang batas kontak fragmen batuan (BMQ-GSQ facies). Sumber: Syafrizal dkk., 2005.	22
Gambar 15	Paragenesa mineralisasi pada Urat Ciurug. (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).	23
Gambar 16	Fotomikrograf yang memperlihatkan variasi mineral logam yang terdapat di Urat Ciurug. Skala batang = 50 μm . (A) <i>Pyrite</i> (Py), <i>sphalerite</i> (Sp), <i>chalcopyrite</i> (Cpy), <i>galena</i> (Gn), <i>acanthite</i> (Ac) dan <i>electrum</i> (El); (B) Butiran <i>pyrite euhedral</i> (Py) diselubungi <i>goethite</i> (Go); (C) mineral sulfida berbutir kasar. <i>Sphalerite</i> (Sp) mengandung butiran <i>chalcopyrite</i> (Cpy) yang sangat halus; (D) <i>Acanthite</i> (Ac) dan <i>electrum</i> (El) bersama dengan	

sphalerite (Sp) dan *pyrite* (Py). *Galena* (Gn) menjadi inklusi dalam *pyrite* (Py); (E) *Pearceite* (Pe) *coexists* dengan *pyrite* (Py) dan *sphalerite* (Sp) dan mineral sulfida lainnya; (F) *Polybasite* (Pol) sebagai agregat bersama *sphalerite* (Sp), *electrum* (El) dan *chalcopyrite* (Cpy); (G) *Bornite* (Bn) *coexists* dengan *chalcopyrite* (Cpy); (H) *Bornite* (Bn) *coexists* dengan *sphalerite* (Sp) dan *galena* (Gn). (Sumber: Syafrizal dkk., 2005)..... 24

Gambar 17 Fotomikrograf yang memperlihatkan keterdapatan *electrum*. (a) *Electrum* dengan butiran relatif kasar terbentuk bersamaan dengan *pyrite*. (b) *Electrum* terdapat bersamaan (*coexists*) dengan *chalcopyrite*, *sphalerite* dan *pyrite*. (c) *Electrum* dijumpai sebagai inklusi dalam *chalcopyrite*. (d) *Electrum* terbentuk bersamaan dengan mineral-mineral sulfida lain. (e) *Electrum* dengan butiran relatif halus dijumpai sebagai inklusi dalam *pyrite*. (f) *Electrum* berbutir halus ditemukan bersamaan (*coexist*) dengan *acanthite*.
Mineral abbreviations: El, *electrum*; Sp, *sphalerite*; Ac, *acanthite*; Cpy, *chalcopyrite*; Py, *pyrite*; Gn, *galena* (Sumber: Syafrizal dkk., 2005). 25

Gambar 18 Histogram yang menunjukkan distribusi ukuran butir *electrum* pada urat Ciurug. (a) Distribusi ukuran butir sesuai dengan lokasi sampel. (b) Distribusi ukuran butir terhadap tahapan mineralisasi. (c) Distribusi ukuran butir sehubungan dengan variasi keterdapatan *electrum*. Tipe-1 (*electrum* muncul sebagai inklusi pada *pyrite*), Tipe-2 (*electrum* muncul sebagai inklusi pada *chalcopyrite*), Tipe-3 (*electrum* muncul berasosiasi dengan *acanthite* ± mineral sulfida lainnya) dan Tipe-4 (*electrum* muncul berdampingan dengan kumpulan mineral *pyrite*, *chalcopyrite*, *sphalerite* ± *galena*) (Sumber: Syafrizal dkk., 2005)..... 26

Gambar 19 Perbandingan kandungan Au dan Ag pada butiran *electrum* berdasarkan analisis EPMA (Sumber: Syafrizal dkk., 2005)..... 26

Gambar 20	(a) Diagram skematik yang menunjukkan zona alterasi yang berkembang pada urat Ciurug. Singkatan mineral: Qz, <i>quartz</i> ; Sm, <i>smectite</i> ; I/Sm, mineral lapisan campuran <i>illite-smectite</i> ; Chl/Sm, mineral lapisan campuran <i>chlorite-smectite</i> ; I, <i>illite</i> ; Chl, <i>chlorite</i> ; Ct, <i>calcite</i> ; Alb, <i>albite</i> ; K-Feld, kalium feldspar; Lau, <i>laumontite</i> . (b) Kisaran stabilitas mineral alterasi hidrotermal yang sensitif terhadap temperatur yang umumnya terjadi pada rangkaian alterasi pH netral (berdasarkan Henley dan Ellis, 1983; Reyes, 1990; Hedenquist dkk., 1996). (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).	28
Gambar 21	Prediksi posisi minimum pembentukan urat (vein) di bawah kedalaman paleo-muka air tanah pada kondisi hidrostatik. (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).....	29
Gambar 22	Hubungan antara data Temperatur Homogenisasi (Th) dan <i>Melting Point</i> Es (Tm) pada inklusi fluida dari sampel urat Ciurug dan Cikoret. (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).....	30
Gambar 23	Diagram hubungan δD dan $\delta^{18}O$ pada air (fluida hidrotermal) yang berasal dari sampel <i>quartz</i> urat Ciurug dan Cikoret. Komposisi air meteorik saat ini berasal dari Sungai Pongkor (Rosana dan Matsueda, 2002). Komposisi fluida air meteorik yang kaya (mata air panas) berasal dari daerah Ungaran, Jawa Tengah (Kohno, 2005). (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).	31
Gambar 24	Histogram menunjukkan diagram frekuensi kandungan Au dalam <i>electrum</i> (% berat Au) dari Endapan Au-Ag Pongkor. (a). <i>Electrum</i> sekunder dan primer dari urat Kubang Cicau (Griffie dkk., 2002). (b). Kandungan Au dari <i>electrum</i> untuk setiap urat utama (Warmada dan Lehman, 2003). (c). Kandungan Au dari <i>electrum</i> sehubungan dengan tahapan mineralisasi (Milesi dkk., 1999). (d). Kandungan Au dari <i>electrum</i> terhadap elevasi dari Urat Ciurug (Syafrizal dkk., 2007). (e). Kandungan Au dari <i>electrum</i> terhadap tahapan mineralisasi dari Urat Ciurug (Syafrizal dkk., 2007).	32

Gambar 25	Penampang yang menunjukkan genesis vein Cikoret dan Ciurug Utara. (A) Sistem vein dan zona alterasi pada vein Cikoret dan Ciurug Utara berdasarkan sampel inti bor (CKT-02, CKT-03, CUT-01A dan CUT-01C). (B) Model yang diusulkan untuk model genetik proses pembentukan vein. Sumbu vertikal dalam meter (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).	35
Gambar 26	Penampang memanjang model endapan untuk Urat Ciurug yang menunjukkan zonasi mineral berdasarkan studi mineralogi dan mikrotermometri (Syafrizal dkk., 2007).	36
Gambar 27	(a) Peta geologi Sulawesi yang menunjukkan distribusi endapan emas, tersebar di Barat dan Utara busur Sulawesi yang didominasi oleh batuan metamorfik dan vulkanik. (b) Peta geologi daerah Prospek Poboya (Sumber : Rivai dkk., 2019).	38
Gambar 28	Zona alterasi hidrotermal pada RRZ (Syafrizal dkk., 2017).	39
Gambar 29	(a) Fotomikrograf <i>electrum</i> , <i>naumannite-aguilarite</i> , <i>chalcopryrite</i> yang mengandung Ag, dan <i>pyrite</i> pada tahap awal; (b) butiran bebas <i>electrum</i> dan hubungan butiran yang tidak merata antara <i>selenopolybasite</i> , <i>argyrodite</i> , dan <i>naumannite-aguilarite</i> pada tahap akhir; (c) inklusi <i>electrum</i> pada <i>pyrite</i> dan pertumbuhan bersama antara <i>naumannite-aguilarite</i> , <i>selenopolybasite</i> , dan <i>freibergite</i> dengan kemunculan kecil <i>sphalerite</i> pada tahap akhir; (d) butiran bebas <i>electrum</i> dan kontak timbal balik sederhana antara <i>naumannite-aguilarite</i> dan <i>galena</i> pada tahap akhir; (e) inklusi <i>electrum</i> dan <i>pyrite</i> pada <i>naumannite-aguilarite</i> pada tahap awal; (f) koeksistensi <i>pyrargyrite</i> , <i>selenopolybasite</i> , dan <i>pyrite</i> pada tahap akhir. Mineral abbreviations: arg, <i>argyrodite</i> ; cp, <i>chalcopryrite</i> ; el, <i>electrum</i> ; fe, <i>freibergite</i> ; gn, <i>galena</i> ; mc, <i>marcasite</i> ; nm-agu, <i>naumannite-aguilarite</i> ; po, <i>pyrrhotite</i> ; py, <i>pyrite</i> , <i>pyra</i> ; <i>pyrargyrite</i> ; sp, <i>sphalerite</i> ; spo, <i>selenopolybasite</i> . (Sumber : Rivai dkk., 2019).	41

Gambar 30	(a) Fotomikrograf yang menunjukkan inklusi fluida primer di zona pertumbuhan <i>calcite</i> yang dipotong oleh inklusi fluida pseudosekunder dan sekunder. Inklusi yang kaya cairan dan uap ada bersamaan. (b) Distribusi data suhu homogenisasi dan salinitas inklusi fluida <i>calcite</i> tahap akhir di River Reef Zone. Singkatan: P, <i>primary</i> ; PS, <i>pseudosecondary</i> ; S, <i>secondary</i> ; L, <i>liquid</i> ; V, <i>vapor</i> (Sumber : Rivai dkk., 2019).....	42
Gambar 31	(a) Peta lokasi Prospek Sopokomil, (b) Peta Geologi, dan (c) Lokasi Endapan SEDEX Utama. (Sumber: Rivai dkk., 2020; 2021).	44
Gambar 32	<i>Pyrrhotite</i> dan <i>metamorphic pyrite</i> hadir <i>coexisting</i> dengan <i>sphalerite</i> (sp), <i>galena</i> (gn), dan <i>chalcopyrite</i> (cp) pada <i>lower ore horizon</i> di Lae Jehe (kiri). Sebuah <i>hand specimen</i> urat <i>quartz</i> (kanan) yang mengandung <i>sphalerite</i> (sp) dan <i>galena</i> (gn) (Sumber: Rivai dkk., 2020).....	45
Gambar 33	Tipe badan bijih pada Sopokomil deposit (Dairi – SEDEX) (A) <i>pyrite-rich massive</i> , (B) <i>sphalerite-rich massive</i> , (C) <i>banded sulfide</i> , (D) <i>galena-rich breccia</i> , (E) vein/urat, dan <i>replacement ore-types</i> (F) (Sumber: Rivai dkk., 2021).	46
Gambar 34	Model genetik konseptual dari deposit Zn-Pb SHMS Sopokomil. (A) Fluida prekursor memasuki zona sumber dalam urutan pengisian celah. (B) Fluida tersebut bersirkulasi di dalam reservoir, mengekstraksi logam, dan menghasilkan (C) Bijih yang tereduksi dan bersifat asam. (D) Saat tiba di lokasi pengendapan, (E) fluida bijih diencerkan oleh <i>porewater</i> sedimen laut yang menghasilkan endapan sulfida. (F) Pengenceran yang terus menerus membuat fluida residu menjadi tidak jenuh terhadap sulfida, lebih dingin, lebih sedikit garam, mendekati netral, dan lebih banyak sulfida. (Sumber: Rivai dkk., 2021).	48
Gambar 35	Tabel periodik <i>rare earth elements</i>	49
Gambar 36	Target eksplorasi REE di Indonesia (PSDMBP, 2023).....	51
Gambar 37	Fotomikrograf (a) sampel Bangka Selatan dan (b) sampel Belitung yang memperlihatkan butir mineral	

	Mnz: <i>monazite</i> ; Zir: <i>zircon</i> ; dan Ilm: <i>ilmenite</i> dalam posisi nikol sejajar (/) dan nikol silang (X) (Syafrizal dkk., 2021).....	52
Gambar 38	Distribusi fraksi ukuran butir keterdapatan mineral pembawa REE pada sampel timah plaser (Syafrizal dkk., 2022).....	53
Gambar 39	Contoh profil pelapukan granitoid di Sulawesi Barat (Syafrizal dkk., 2022)	55
Gambar 40	Normalisasi REE terhadap <i>chondrite</i> pada sampel dari Pulau Bangka dan Sulawesi Barat (Alvionita dkk., 2023; Syafrizal dkk., 2021)	56
Gambar 41	Representasi pola XRD dari profil lapukan granitoid (atas: horizon A, bawah: horizon B). Qz. quartz; Hly. haloisit; Kln. Kaolinite (Alvionita dkk., 2023).....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Model Deskriptif Endapan Au-Ag Epitermal Pongkor (Syafrizal dkk., 2007)	33
Tabel 2	REE beserta kegunaannya (Goonan, 2011)	50

1. PENDAHULUAN

Logam dan produk mineral lainnya sangat penting bagi masyarakat modern. Logam dan mineral ditemukan dalam produk-produk yang kita gunakan setiap hari, mulai dari peralatan dapur, peralatan elektronik, peralatan komunikasi, hingga peralatan kedokteran. Logam dan mineral juga merupakan bahan dasar pembangunan rumah, kantor dan jembatan, serta pembuatan mobil, kereta api dan pesawat terbang, dan digunakan secara tidak langsung sebagai katalisator, semen, obat-obatan dan pupuk. Pasokan logam dan mineral yang berasal dari cebakan (endapan) bijih harus selalu disertai dengan penemuan baru untuk dapat menggantikan endapan bijih yang telah habis. Untuk memenuhi kebutuhan logam dan mineral yang terus meningkat, maka penemuan endapan baru berkelas dunia harus ditemukan setidaknya setiap beberapa tahun sekali.

Sebelum melangkah lebih jauh, walaupun dewasa ini perkembangan teknologi daur ulang sangat pesat, tetapi pemikiran bahwa sudah tidak perlu melakukan kegiatan penambangan untuk mendapatkan komoditas mineral dari tambang harus disingkirkan jauh-jauh. Namun, pemahaman bahwa penurunan kebutuhan komoditas tambang (logam dan mineral) dengan berkembangnya teknologi daur ulang adalah keniscayaan.

Pada saat ini, industri pertambangan dihadapkan pada kelanjutan dari sejarah panjang pertumbuhan permintaan mineral. Sejauh ini, komoditas mineral yang telah mengalami penurunan signifikan penggunaan dan juga produksinya adalah logam-logam yang memiliki efek beracun seperti Hg. Dalam beberapa waktu mendatang, produksi batubara dan minyak bumi juga diproyeksikan akan menurun karena kontribusinya terhadap tingkat CO₂ di atmosfer. Namun demikian, hampir semua logam dan produk mineral lainnya, seperti tembaga hingga alumunium, konsumsi dan produksi akan terus meningkat. Banyak dari logam atau unsur-unsur ini memainkan peran penting dalam pengembangan teknologi khususnya pada sumber energi baru seperti sel fotovoltaik surya (Si, Cd, Te, Se) dan turbin angin (Fe, Cu, Al, REE), serta dioda pemancar cahaya (LED; Sb, In, REE), konverter katalitik (Pt, Pd, Rh, REE, Ce), baterai mobil listrik (REE, Li), dan terutama ponsel pintar, yang mengandung setidaknya 60 elemen yang berbeda.

Istilah "deposit (endapan) bijih" memiliki arti khusus dalam banyak literatur di bidang geologi, yaitu "suatu massa batuan yang mengandung unsur, senyawa, atau mineral yang berharga dengan kadar dan jumlah total yang cukup tinggi sehingga bahan tersebut dapat ditambang secara ekonomis". Endapan bijih merupakan bagian penting dari istilah "deposit (endapan) mineral" yang lebih luas, yaitu mencakup konsentrasi unsur atau mineral secara alami.

Pada bidang geologi ekonomi (*economic geology*), istilah "cadangan mineral" sering didefinisikan sebagai komoditas berharga (seperti emas atau tembaga) atau mineral (seperti permata atau mineral industri) yang memiliki ukuran dan konsentrasi (kadar) yang memadai sehingga dalam dapat dieksploitasi secara ekonomis. Pada kondisi yang lebih khusus, istilah "cadangan bijih" adalah cadangan mineral yang telah ditemukan, telah diketahui ukuran, kadar, dan aksesibilitas yang memadai sehingga memungkinkan untuk diekstraksi secara menguntungkan.

Pemodelan endapan didefinisikan sebagai proses penyusunan secara sistematis semua informasi yang diketahui mengenai endapan (karakteristik dan lingkungannya), dengan tujuan untuk mendefinisikan dan menjelaskan fitur-fitur pentingnya (Cox dan Singer, 1986). Pemodelan endapan mineral biasanya merupakan elemen penting dalam studi endapan mineral, dan selalu terkait dengan konsep dasar seperti genesis dan jenis endapan. Pemodelan endapan mineral mencerminkan keseluruhan analisis dari beberapa teknik untuk mengkuantifikasi endapan, seperti studi alterasi, mineralogi, inklusi fluida dan isotop stabil, serta observasi langsung di lapangan.

2. PEMODELAN ENDAPAN (*DEPOSIT MODELLING*)

Cox dan Singer (1986) mengusulkan beberapa definisi mendasar tentang terminologi "keterdapatan mineral", "endapan mineral", dan "endapan bijih". "Keterdapatan mineral" adalah konsentrasi mineral yang dianggap berharga pada suatu tempat, atau memiliki nilai secara ilmiah atau teknis. "Endapan mineral" adalah keterdapatan mineral yang ukuran dan kadarnya dapat dianggap memiliki potensi ekonomi. "Endapan bijih" adalah endapan mineral yang telah diuji dan diketahui memiliki ukuran, kadar, dan aksesibilitas yang cukup untuk diekstraksi secara ekonomis.

Sebuah model dapat dideskripsikan melalui hasil pengamatan atau berdasarkan data-data yang terukur. Model dapat bersifat teoretis jika didasarkan pada ide konseptual mengenai genesa endapan. Secara umum, model memiliki dua persyaratan: (1) harus terbuka sehingga informasi baru tentang endapan dapat ditambahkan di masa depan, dan (2) pengguna harus dapat dengan mudah menemukan model-model yang sesuai (Cox dan Singer, 1986). Data-proses-kriteria adalah komponen penting dalam sebuah model untuk suatu endapan mineral. Model ini memiliki tiga elemen utama: data, proses, dan kriteria untuk eksplorasi. Data merujuk pada karakteristik geologi dari jenis endapan. Proses diinterpretasikan dari karakteristik geologi endapan. Karakteristik geologi yang paling informatif dapat digunakan sebagai kriteria panduan untuk eksplorasi.

Untuk terminologi yang lebih mendasar, sebuah "model endapan mineral" adalah rangkuman informasi yang sistematis (atau deksripsi) mengenai karakteristik geologi, kadar, ukuran, dan asal-usul suatu kelompok endapan mineral yang serupa. Model endapan mineral ini dapat bersifat empiris (berdasarkan pengamatan atau data yang terukur) dan/atau secara teoretis (berdasarkan konsep-konsep dasar mengenai asal-usul endapan).

Logam dan mineral dapat terkonsentrasi untuk mencapai suatu kadar tertentu menjadi deposit (endapan) bijih melalui berbagai proses geologi yang kompleks pada lingkungan geologi tertentu atau dikenal juga sebagai proses pembentukan bijih. Para ahli geologi ekonomi sependapat bahwa endapan mineral dapat dengan mudah diklasifikasikan berdasarkan kesamaan karakteristik kondisi geologinya seperti mineralogi bijih dan *gangue*, geokimia

unsur utama dan jejak, litologi batuan induk, perubahan (alterasi) batuan dinding, sifat fisik bijih, dan lain-lain.

Skema klasifikasi berbasis geologi awal telah berkembang menjadi model cebakan mineral yang mengklasifikasikan cebakan tidak hanya berdasarkan karakteristik geologi, tetapi juga berdasarkan karakteristik geofisika dan geokimia serta proses genetik pembentukan cebakan (Cox dan Singer, 1986). Model-model endapan mineral secara konseptual ini menjadi dasar dari sebagian besar perancangan dan pemilihan metodologi eksplorasi mineral modern, serta juga telah digunakan secara luas sebagai alat untuk membantu dalam melakukan penilaian terhadap potensi sumber daya mineral yang belum ditemukan pada wilayah yang memiliki karakteristik geologi tertentu.

Selain itu, karakteristik geologi yang melekat pada tipe endapan (deposit) tertentu dapat dipelajari lebih lanjut untuk membantu mengurangi potensi masalah lingkungan yang mungkin timbul. Perencanaan dan pengembangan tambang dapat dilakukan dengan lebih baik jika model endapan telah diketahui dengan baik, serta telah didukung oleh model lingkungan sehingga akan memungkinkan perencana tambang untuk mengantisipasi, merencanakan, dan memitigasi potensi masalah produksi maupun masalah lingkungan dengan lebih baik.

Langkah selanjutnya dalam proses pemodelan cebakan mineral adalah pengembangan model geologi untuk beragam jenis cebakan mineral. Geologi deposit mineral, serta proses geokimia dan biogeokimia, pada dasarnya mengendalikan kondisi lingkungan yang ada di daerah mineralisasi alami sebelum penambangan, dan kondisi yang diakibatkan oleh penambangan dan pengolahan mineral. Kebutuhan dan penggunaan model geo-lingkungan saat ini sangat relevan; mulai dari prediksi dan mitigasi lingkungan, dan karakterisasi endapan, hingga eksplorasi mineral dapat dilakukan dengan efektif, perkiraan ukuran dan kadar dapat dilakukan dengan lebih presisi, sehingga penilaian kelayakan penambangan secara ekonomis dapat diperoleh dengan tingkat kepercayaan yang tinggi, serta pada akhirnya penilaian potensi bentuk lahan bekas tambang yang nantinya akan ditinggalkan dapat direncanakan sejak awal.

Secara umum, pemodelan endapan ini dapat dimulai dari model deskripsi, lalu diterjemahkan lebih lanjut menjadi model genetik dan model endapan. Setelah model endapan terbentuk, akan dilanjutkan dengan analisis lanjut

dengan mempertimbangkan prospek teknis dan ekonomis, sehingga terbentuk model sumberdaya dan model cadangan.

2.1 Model Deskripsi

Model deskripsi: suatu model yang disusun untuk menjelaskan karakteristik kondisi (geologi, fisika, kimia, mineralisasi) suatu endapan. Model deskripsi ini dapat memuat uraian-uraian antara lain informasi umum, deskripsi endapan, dan informasi tambahan sebagai pelengkap.

Informasi umum berupa perkiraan tipe endapan, contoh endapan yang mirip (similar), hubungan genetik secara spasial dengan tipe endapan lain, serta keunikan yang berpotensi memiliki implikasi pada eksplorasi, penambangan, atau lingkungan.

Deskripsi endapan berupa komoditas utama dan produk sampingan, karakteristik geologi antara lain deskripsi ringkas, tatanan tektonik, lingkungan pengendapan/setting geologi, umur mineralisasi, jenis batuan induk/asosiasi, bentuk endapan, tekstur/struktur, mineralogi bijih, mineralogi *gangue*, mineralogi alterasi, kontrol bijih, jenis endapan terkait.

Selain itu, dapat dilengkapi dengan informasi tambahan yang akan bermanfaat untuk pengembangan endapan ini di tahap selanjutnya, antara lain: ciri-ciri spesifik geokimia, ciri-ciri spesifik geofisika, kadar dan tonase yang umum, potensi mineral atau unsur ikutan atau sekunder, batasan-batasan keekonomian, serta keutamaan atau kegunaan utama.

2.2 Model Genetik

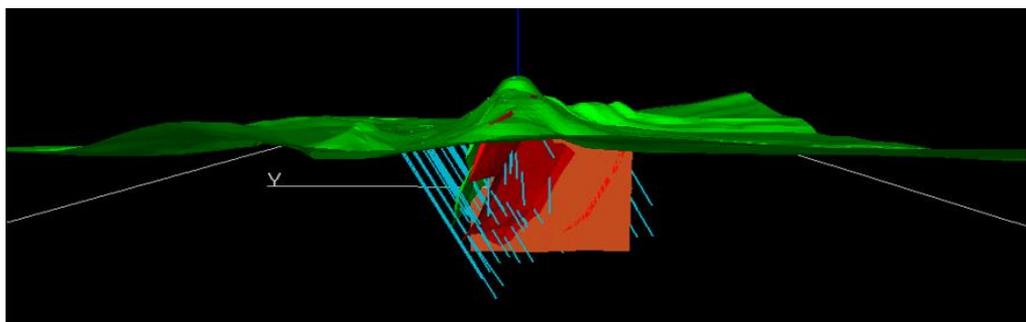
Model genetik: suatu model yang disusun untuk menjelaskan secara skematik bagaimana asal usul atau pembentukan suatu endapan mineral serta lebih spesifik pada pemahaman proses yang mengarah pada konsentrasi mineral dan bijih berharga pada suatu endapan. Hal ini termasuk memahami dari mana sumber logam atau mineral, bagaimana mekanisme pengangkutan, serta faktor-faktor yang terlibat sehingga membentuk konsentrasi yang ekonomis.

Singkatnya, model genetik dapat membantu para ahli geologi eksplorasi memahami interaksi yang kompleks antara faktor-faktor geologi yang

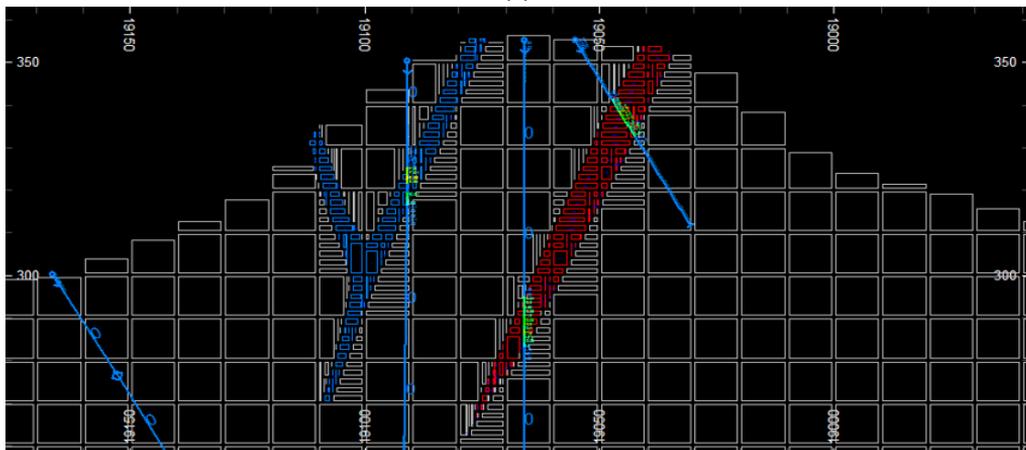
menyebabkan terbentuknya endapan mineral. Pengetahuan ini sangat penting untuk dapat menemukan badan bijih baru dan untuk operasi pertambangan yang bertujuan untuk mengekstraksi logam-logam yang berharga.

2.3 Model Endapan

Model endapan: suatu model konseptual yang menggambarkan kerangka atau karakterisasi geologi yang spesifik suatu endapan. Suatu model endapan umumnya disusun secara spesifik berdasarkan hasil observasi, pengukuran, analisis kimia, analisis mineralogi, dan lain-lain yang umumnya disajikan dalam bentuk peta 2 dimensi maupun penampang 2 dimensi, ataupun model 3 dimensi. Contoh model endapan yang disusun dari hasil interpretasi data eksplorasi dapat dilihat pada Gambar 1(a) dan Gambar 1(b).



(a)



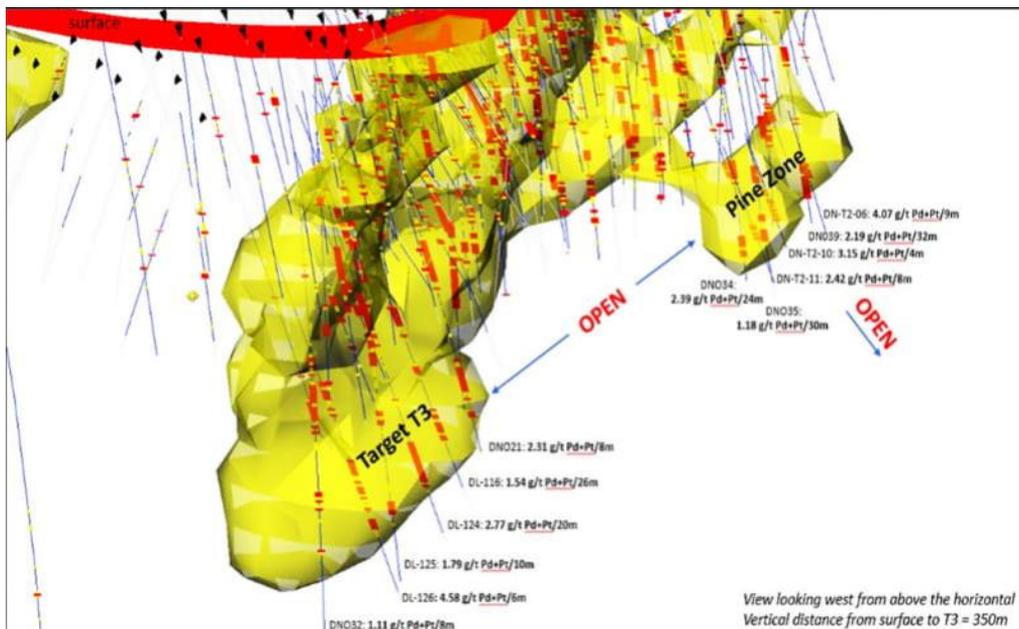
(b)

Gambar 1 Contoh model endapan emas dengan sistim urat. (a) Bentuk endapan dihasilkan melalui korelasi lubang bor. (b) Bentuk endapan berupa urat yang ditentukan melalui nilai kadar dari hasil pengeboran. (Sumber : Syafrizal, koleksi pribadi).

2.4 Model Sumberdaya

Model sumberdaya : suatu model yang dapat menggambarkan secara 2D atau 3D suatu endapan mineral berdasarkan hasil eksplorasi rinci sehingga telah dapat menggambarkan suatu konsentrasi mineral yang memiliki nilai ekonomi pada atau di atas kerak bumi, dengan bentuk, kualitas, dan kuantitas tertentu yang memiliki keprospekan yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis (Gambar 2).

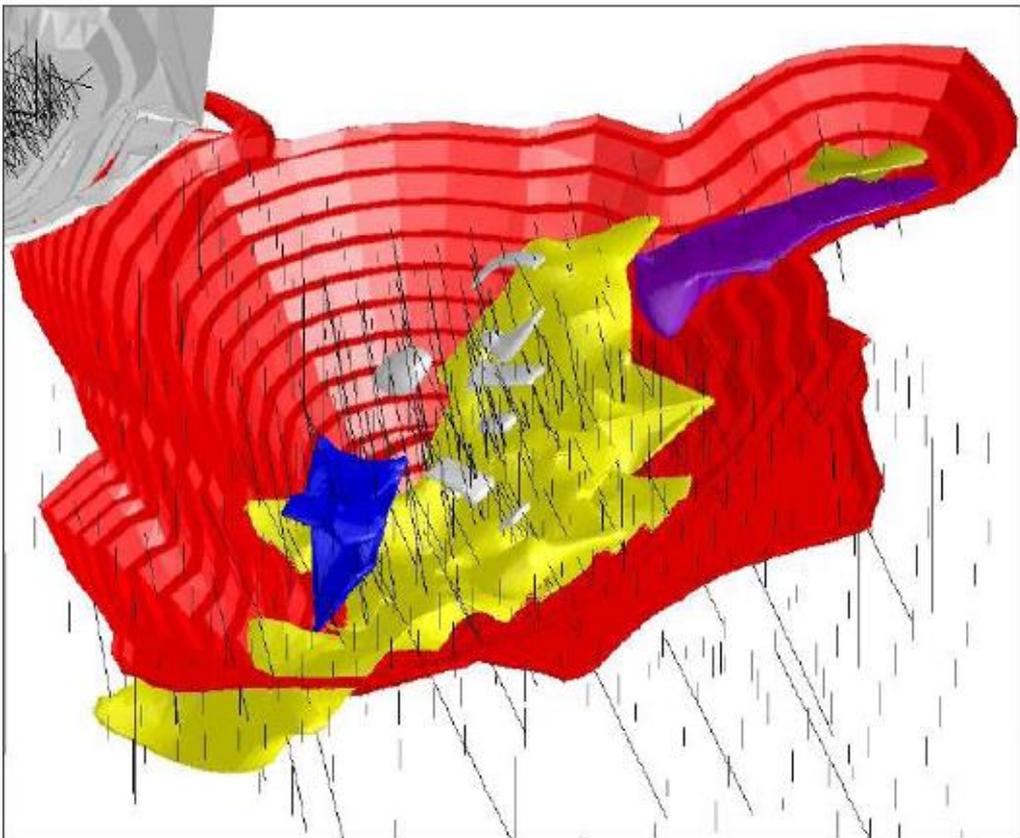
Potensi ekonomi ini lebih untuk menyatakan indikasi kuat akan nilai ekonomis yang diketahui berdasarkan analisis pasar untuk menentukan potensi yang ekonomis. Bagian dari endapan (deposit) yang tidak (belum) memiliki prospek yang beralasan yang pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis tidak dapat disebut sebagai sumberdaya mineral. Lokasi, kuantitas, kadar, karakteristik geologi, dan kemenerusan sumber daya mineral harus diketahui, diestimasi, atau diinterpretasikan berdasarkan bukti dan pengetahuan geologi yang spesifik, termasuk pengambilan sampelnya (SNI 4726, 2019).



Gambar 2 Contoh model sumberdaya. (Sumber: <https://newagemetals.com/mineral-exploration-a-short-guide-to-understanding-the-process/>)

2.5 Model Cadangan

Model cadangan: merupakan model yang diturunkan dari sebagian sumberdaya yang memenuhi persyaratan untuk ditambang dan ekstraksi (ketebalan, kadar/kualitas, dan kedalaman) yang memenuhi persyaratan hukum dan ekonomis pada saat ini (Gambar 3). Identifikasi telah melibatkan kegiatan eksplorasi untuk menemukan deposit mineral, penentuan volume, kualitas, dan distribusi mineral dalam deposit, serta kelayakan ekonomis untuk menilai apakah deposit tersebut layak ditambang dari segi ekonomi. Pada penyusunan model cadangan ini pengkajian dan studi yang tepat sudah dilakukan dan termasuk pertimbangan dan modifikasi dari asumsi yang realistis atas faktor-faktor penambangan, pengolahan, pemurnian, ekonomi, pemasaran, legal, lingkungan, sarana dan prasarana, sosial, dan peraturan perundang-undangan (SNI 4726, 2019).



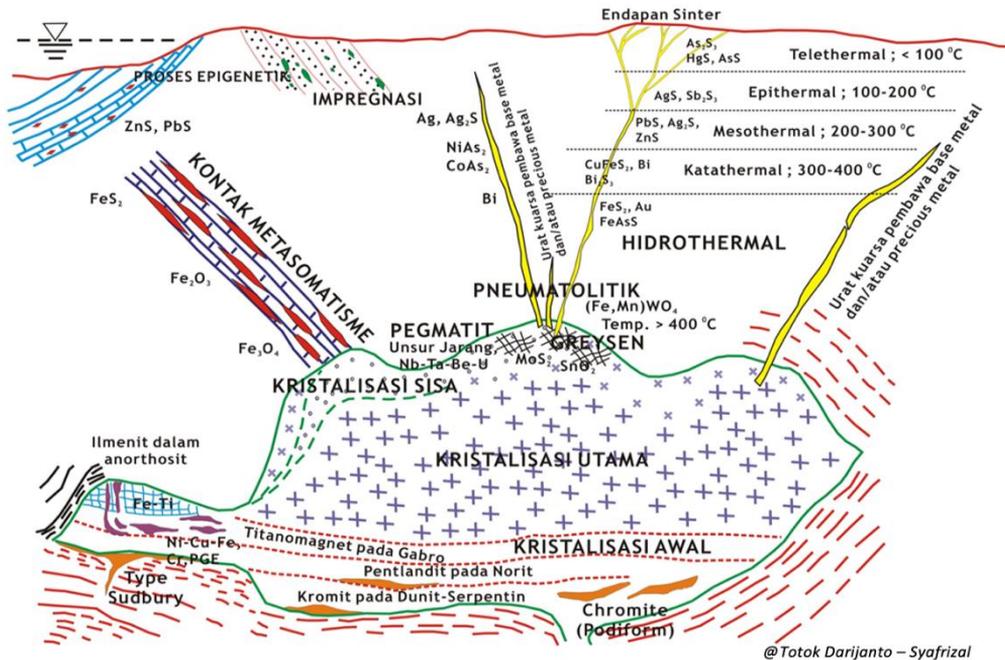
Gambar 3 Contoh model cadangan dengan sistem tambang terbuka (Sumber: GSGS MINERALS SERVICES – T3 SGS 849 - 09-2013).

3. PEMBENTUKAN ENDAPAN BAHAN GALIAN

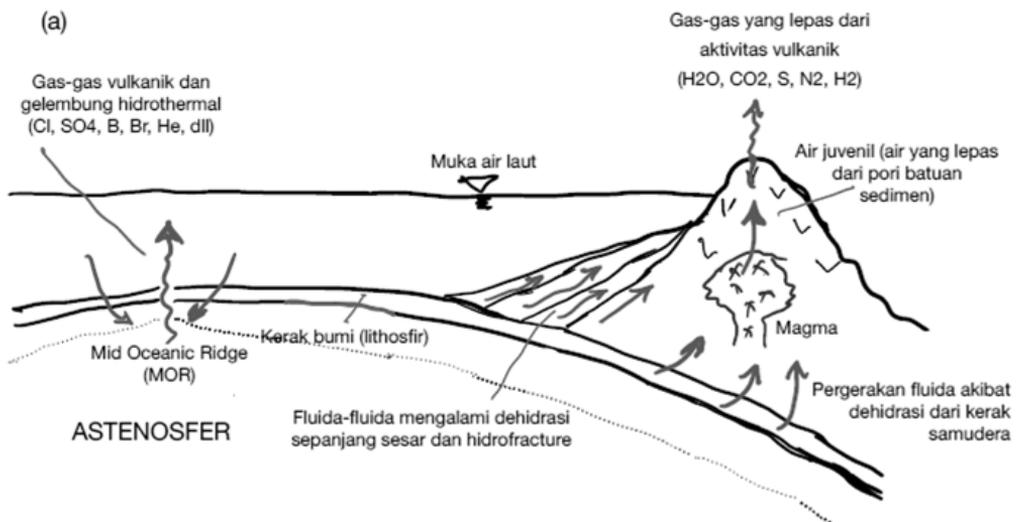
Secara umum, pembentukan endapan bahan galian di kerak bumi dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) yang utama, yaitu pembentukan endapan primer dan pembentukan endapan sekunder.

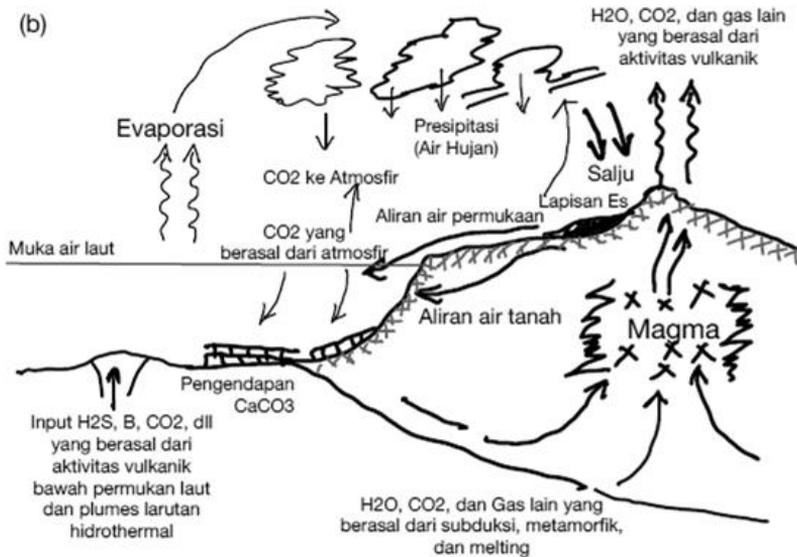
3.1 Pembentukan Endapan Primer

Pembentukan endapan primer adalah endapan-endapan yang terbentuk akibat dari interaksi fluida-fluida yang berasal dari bawah permukaan bumi atau pembentukan endapan-endapan yang berhubungan langsung dengan magma yang berinteraksi dengan lingkungan geologi disekitarnya. Endapan-endapan yang merupakan akumulasi mineral-mineral yang langsung mengkristal dari magma disebut dengan endapan magmatik cair (orthomagmatik). Endapan-endapan yang terbentuk dari larutan sisa magma yang relatif lebih ringan dan banyak mengandung gas, berinteraksi dengan fluida-fluida metamorfik, serta kontak dengan batuan sekitar dikenal dengan endapan pegmatik. Pada kondisi akumulasi gas yang relatif tinggi sehingga menyebabkan kondisi pada tekanan tinggi (pneumatolitik) sehingga terbentuk endapan greissen maupun endapan-endapan metasomatisme. Endapan-endapan yang terbentuk dari interaksi antara larutan sisa magma dengan fluida-fluida yang berasal dari atmosfer (fluida meteorik) maupun dengan fluida-fluida yang tadinya berupa kristal air yang terdapat dalam pori-pori batuan (*connate water*) dan relatif mendekati permukaan dikenal dengan endapan pada sistem hidrotermal sehingga terbentuk endapan katathermal hingga endapan sinter di dekat permukaan. Pada Gambar 4 dapat dilihat sketsa penyederhanaan model pembentukan endapan primer dan pada Gambar 5 dapat dilihat interaksi fluida yang terjadi.



Gambar 4 Sketsa yang memperlihatkan model pembentukan endapan primer (Sumber: Totok Darijanto & Syafrizal, koleksi pribadi).

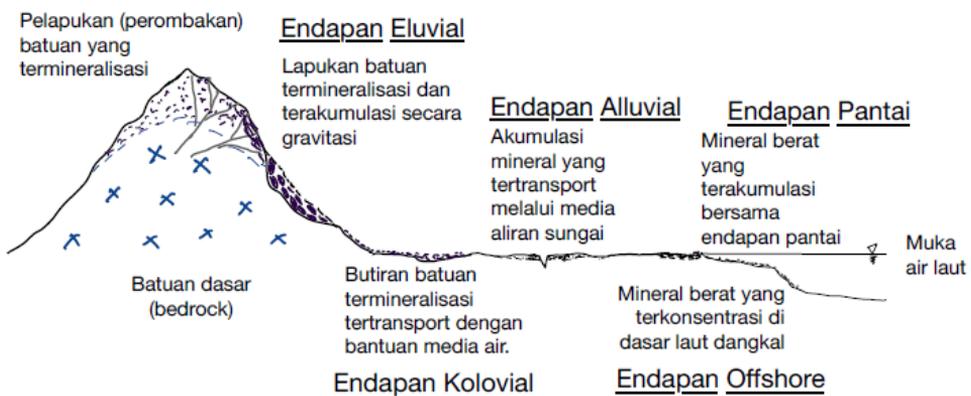




Gambar 5 (a-b) Sketsa yang memperlihatkan interaksi fluida yang terjadi pada pembentukan endapan primer (SyafriZal 2023, dikompilasi dan digambar dari berbagai sumber).

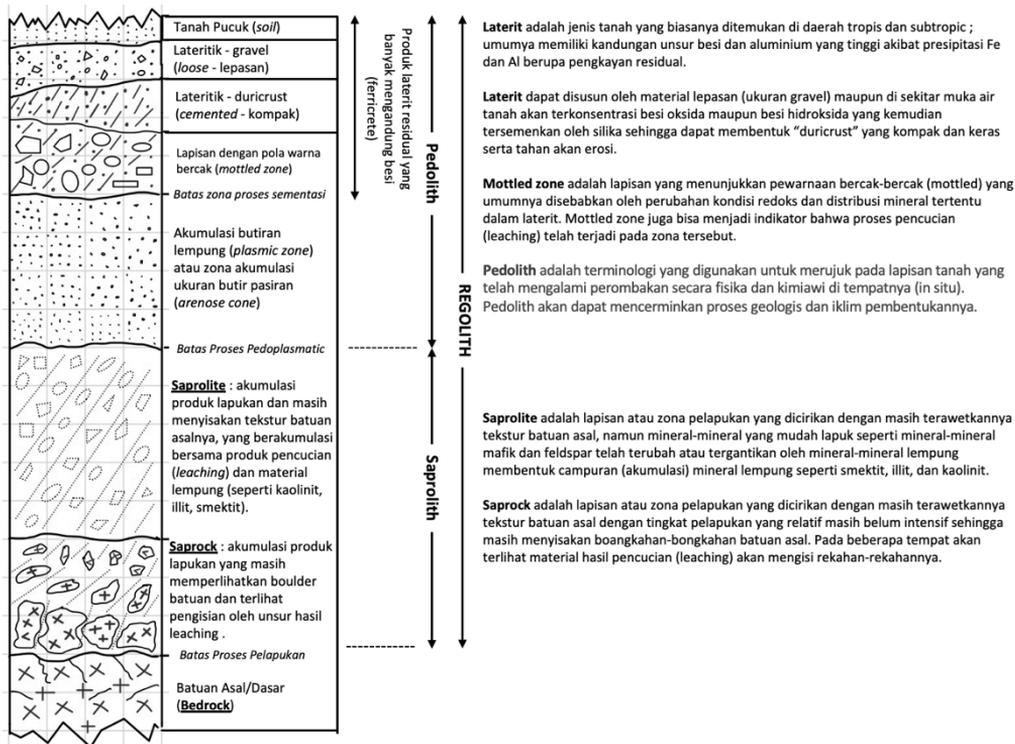
3.2 Pembentukan Endapan Sekunder

Pembentukan endapan sekunder adalah endapan-endapan yang terbentuk akibat dari perombakan, pengendapan kembali, serta pengkayaan dari endapan yang telah ada (terbentuk) sebelumnya. Pembentukan endapan sekunder ini dikelompokkan menjadi 2 (dua) mekanisme utama, yaitu proses pembentukan secara mekanis dan proses pembentukan secara kimiawi.



Gambar 6 Sketsa yang memperlihatkan pembentukan endapan sedimenter – plaser (SyafriZal 2023, dikompilasi dan digambar dari berbagai sumber).

Proses pembentukan secara mekanis akan membentuk endapan-endapan yang terbentuk sesuai dengan berat jenis mineral, ukuran butir, serta daya tahan terhadap pelapukan dan benturan sehingga dapat dikelompokkan menjadi endapan kolovial, eluvial, alluvial, pantai, dan dasar laut (*offshore*) sesuai dengan lokasi tempat terakumulasinya. Endapan yang terbentuk akibat proses mekanis ini dikenal dengan nama Endapan Sedimenter atau Endapan Plaser. Pada Gambar 6 dapat dilihat sketsa penyederhanaan pembentukan endapan sedimentar atau endapan plaser ini.



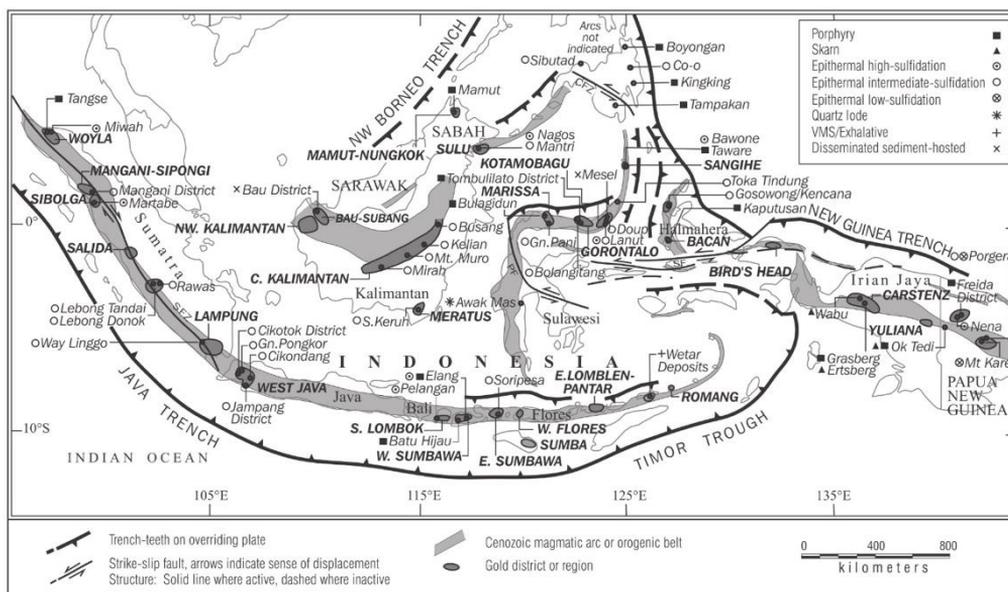
Gambar 7 Sketsa yang memperlihatkan pembentukan endapan laterit (Syafrizal 2023, dikompilasi dan digambar dari berbagai sumber).

Proses pembentukan secara kimiawi akan membentuk endapan sesuai dengan sifat mobilitas unsur logam. Unsur-unsur logam dapat mengalami pencucian (*leaching*) akibat adanya aliran air yang relatif asam. Pada bagian atas dari material hasil penguraian batuan (*regolith*) akan terbentuk endapan berupa unsur-unsur yang tidak mudah terlindi yang disebut dengan endapan-endapan residu (atau limonit). Sedangkan untuk unsur-unsur yang dapat (mudah) terlindikan akan terkumulasi di bagian bawah yang disebut dengan endapan-endapan laterit pada zona saprolit. Endapan bauksit (pembawa

aluminium) dan endapan limonit (pembawa besi) umumnya terbentuk pada zona residual atau zona *pedolith*. Sedangkan endapan nikel laterit pada umumnya terkayakan pada zona saprolith dengan mekanisme pelindian (*leaching*). Pada Gambar 7 dapat dilihat penjelasan zona-zona yang ada pada endapan sekunder yang terbentuk secara kimiawi (endapan laterit).

4. SISTEM ENDAPAN HIDROTERMAL

Berdasarkan banyak literatur yang tersedia hingga saat ini, diyakini bahwa sebagian besar potensi logam dasar (Cu - Pb - Zn) dan logam mulia (Au - Ag) di Indonesia berasal (bersumber) dari endapan yang tergolong pada Endapan Sistem Hidrotermal. Pada Gambar 8 dapat dilihat sebaran potensi endapan (mineralisasi) pembawa Emas (Au) beserta mineral-mineral pengikutnya.

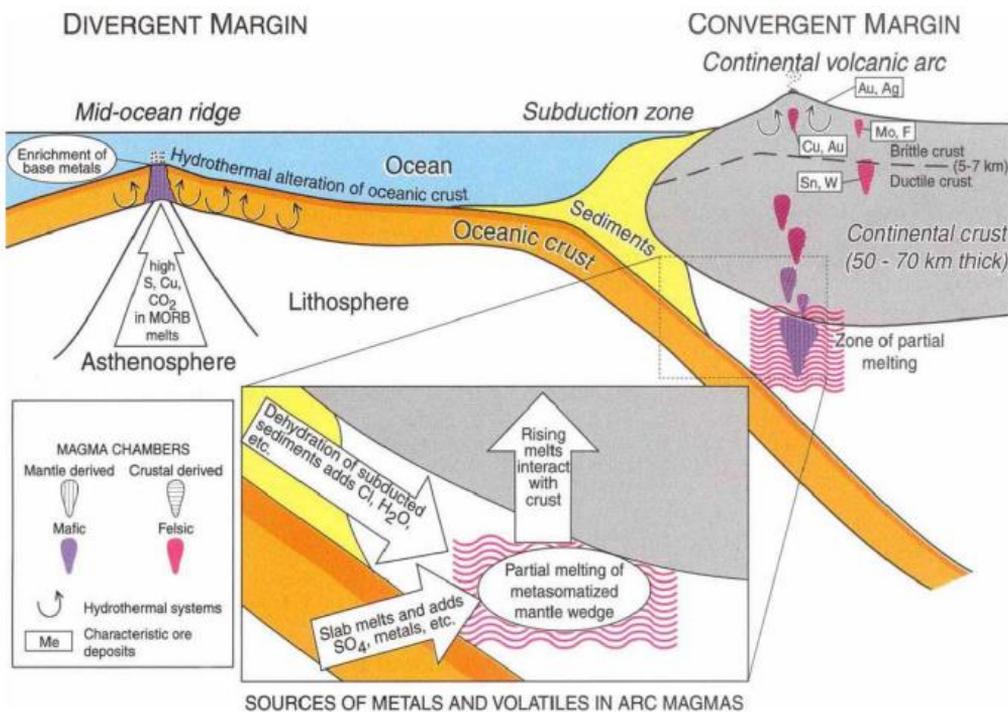


Gambar 8 Busur Magmatik dan Lokasi Endapan Cu-Au Utama Indonesia (Sumber: Garwin dkk., 2005).

4.1 Endapan Hidrotermal

Secara definisi, hidrotermal berasal dari dua kata, yaitu *hidro* dan *termal*. *Hidro* secara umum berarti air (dalam hal ini umum digunakan istilah fluida) dan *termal* secara umum berarti panas. Pada lingkup keilmuan genesa bahan galian, sistem mineralisasi hidrotermal merupakan suatu sistem pembentukan endapan mineral yang berasal dari pergerakan fluida yang relatif panas pada kerak bumi. Mirip dengan kondisi umum pembentukan endapan, mineralisasi pada sistem hidrotermal sedikitnya memiliki 3 (tiga) komponen (syarat) utama yang harus terpenuhi, yaitu adanya sumber fluida, tersedianya media aliran fluida, serta adanya media perangkap (lingkungan) pengendapan yang memungkinkan mineralisasi terkonsentrasi.

Fluida hidrotermal berperan dalam mentransportasikan logam dari lokasi sumber menuju lokasi pengendapan. Fluida adalah zat atau larutan (dapat berupa gas atau cairan) yang memiliki kemampuan untuk mengalir dan mengalami deformasi pada saat menerima gaya atau tekanan. Keberadaan aliran fluida pada sistem hidrotermal dapat disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur dan tekanan. Fluida yang memiliki temperatur lebih tinggi cenderung bergerak naik dan fluida yang memiliki temperatur lebih rendah cenderung bergerak turun. Adapun perbedaan tekanan berperan dalam mengalirkan fluida dari titik yang memiliki tekanan lebih tinggi menuju titik yang memiliki tekanan lebih rendah. Salah satu pergerakan fluida karena perbedaan tekanan adalah aliran fluida menuju rekahan saat terjadi pembentukan zona rekahan ekstensional.



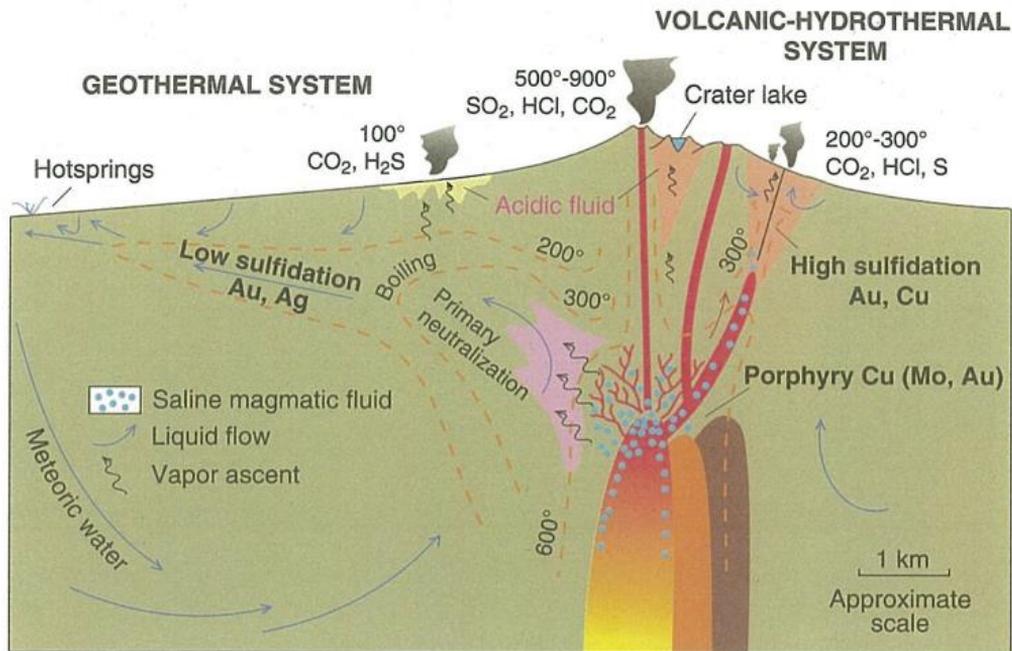
Gambar 9 Ilustrasi yang memperlihatkan mekanisme pembentukan fluida hidrotermal serta asal logam (Sumber: Hedenquist & Lowenstern, 1994).

Mineral-mineral pembawa logam adalah komponen yang sangat penting untuk menyebabkan suatu wilayah memiliki kandungan logam. Dengan demikian, keberadaan sumber logam merupakan salah satu syarat mutlak agar endapan mineral yang ekonomis dapat terbentuk. Hipotesis yang saat ini masih diyakini untuk menjelaskan sumber logam adalah berasal dari

pelelehan parsial (*partial melting*) lempeng yang tersubduksi atau peleburan mantel (selubung) bumi karena adanya interaksi dengan fluida-fluida sekitar pada saat terjadi proses subduksi (Gambar 9).

4.2 Interaksi Fluida Hidrotermal

Massa batuan pada kerak bumi merupakan media utama tempat mengalirnya fluida hidrotermal. Massa batuan dapat terdiri atas batuan utuh dan diskontinuitas. Kedua jenis massa batuan tersebut berkontribusi terhadap aliran fluida hidrotermal selama tersedia ruang kosong (*void*) pada kedua jenis massa batuan tersebut yang saling terhubung satu sama lain. Konektivitas ruang kosong ini yang dikenal sebagai permeabilitas. Semakin tinggi densitas rekahan, nilai permeabilitas umumnya akan tinggi. Selain densitas rekahan, permeabilitas sekunder juga dipengaruhi oleh pengendapan mineral dari fluida hidrotermal yang mengalir melalui rekahan-rekahan tersebut. Penutupan rekahan batuan oleh mineral yang mengendap akan menurunkan nilai permeabilitas batuan.



Gambar 10 Skema sistem hidrotermal yang memperlihatkan posisi relatif endapan porfiri, endapan *epithermal high sulphidation*, dan endapan *epithermal low sulphidation* (Sumber: Hedenquist & Lowenstern, 1994).

Berdasarkan interaksi fluida, temperatur pembentukan, lingkungan pembentukan, serta mekanisme aliran fluida, maka pada sistem endapan hidrotermal secara sederhana dapat dikelompokkan menjadi endapan porfiri, endapan *epithermal high sulphidation*, dan endapan *epithermal low sulphidation* (Gambar 10). Pada ilustrasi tersebut dapat dilihat bagaimana interaksi fluida magmatik dengan air meteorik sehingga menyebabkan adanya *gradien thermal*, posisi relatif, serta kondisi larutan (fluida asam, mendekati netral, dan *saline*).

5. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN EMAS – PERAK EPITHERMAL GUNUNG PONGKOR

Penyajian model endapan akan didasarkan pada informasi geologis yang sudah ada dan data yang baru dikumpulkan. Tidak ada format yang khusus atau konsisten yang telah dikembangkan untuk menyajikan model endapan mineral karena deskripsi tipe endapan umumnya mencerminkan keahlian atau minat khusus penulis. Data geologis dan konsep dibuat dari informasi geologis eksplorasi. Informasi ini mencakup data dan konsep ilmu dasar, jenis endapan mineral, tatanan geologi di mana endapan terbentuk, dan wilayah yang dipertimbangkan untuk eksplorasi. Secara umum, interpretasi genetik sebuah endapan akan menjadi faktor signifikan dalam membentuk model. Semua model melibatkan asumsi dan interpretasi. Suatu model dimulai dari deskripsi, tetapi berbagai aspek akan menjadi sebuah genetik apabila penjelasan genetik tersebut menjadi logis.

Model endapan mineral (bijih) deposit Pongkor disajikan berdasarkan data yang tersedia dan karakteristik dari vein Ciurug, Cikoret, dan Ciurug Utara. Model genetik dari vein Ciurug-Cikoret dikembangkan dari studi alterasi, tekstur dan mineralogi vein, kumpulan *precious metal* dan *base metal*, suhu dan komposisi fluida hidrotermal, serta mekanisme hadirnya *base metal* berdasarkan mikrotermometri dan studi isotop stabil, dan juga posisi pembentukan vein relatif terhadap paleo-muka air tanah.

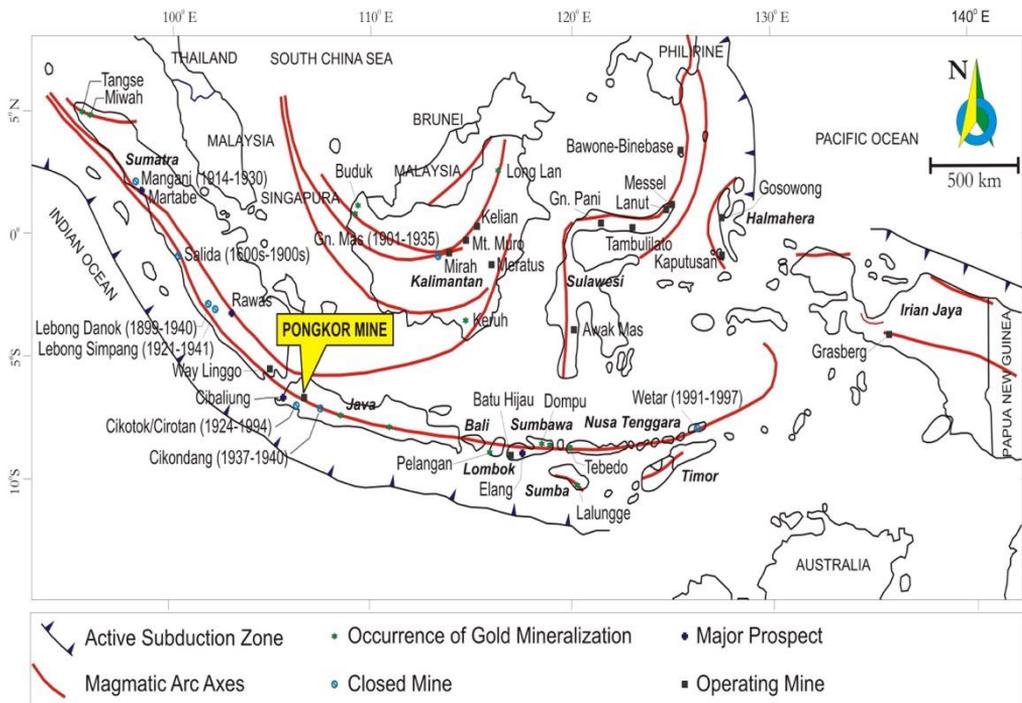
Model endapan bijih pada skala deposit (endapan Pongkor), dilakukan kompilasi data Ciurug-Cikoret dan data sebelumnya tentang endapan Pongkor (Basuki dkk., 1994; Milesi dkk., 1999; Griffie dkk., 2002; Warmada dan Lehman, 2003). Data paling relevan dari penelitian ini dan dari peneliti sebelumnya akan disederhanakan dan digeneralisir. Dengan demikian, karakteristik khusus atau kecenderungan data akan ditunjukkan sebagai panduan untuk tujuan lain (eksplorasi, aspek teknis, atau perencanaan tambang).

5.1 Ringkasan Karakteristik dan Model Deskriptif Endapan Epitermal Pongkor

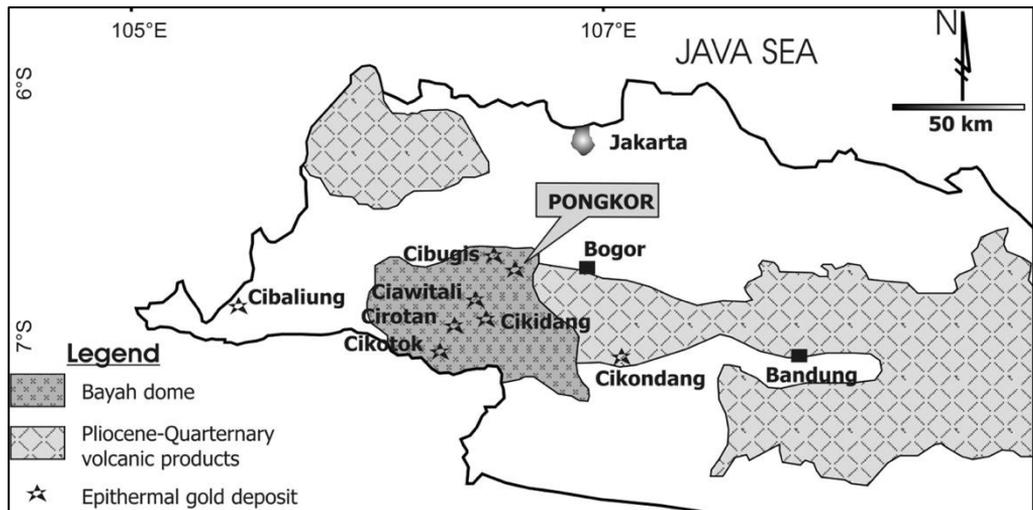
5.1.1 Lingkungan Geologi

Endapan Pongkor terletak di Busur Sunda-Banda (Gambar 11 (a) dan Gambar 11(b)) sepanjang tepi lempeng Indo-Australia yang tenggelam dengan lempeng Eurasia selama Cenozoik (Carlile dan Mitchell, 1994). Deposit Pongkor berumur sekitar $2,05 \pm 0,05$ Ma (Milesi dkk., 1999). Mineralisasi emas terkait dengan gerakan struktural yang berarah Utara-Selatan. Sistem patahan berskala regional menunjukkan struktur lingkaran (8x6 km) dan diinterpretasikan sebagai depresi vulkano-tektonik (Milesi dkk., 1999). Batuan induk dari endapan Pongkor terdiri dari batuan vulkanik (andesit, tufa lapili, dan breksi tufa) dari Miosen hingga Kuartir-Pliosen. Vein yang termineralisasi umumnya ditemukan dalam tufa dan breksi tufa lapili dengan komposisi basaltik hingga andesit.

Adanya pengaruh tektonik dan depresi vulkano-tektonik menciptakan jalan bagi fluida hidrotermal untuk mengendapkan bijih primer dalam vein (Gambar 12). Mineralisasi terjadi saat fluida meteorik yang naik mendidih (Henley, 1985; Hedenquist dkk., 2000) dan bercampur dengan air tanah dingin dalam retakan di batuan vulkanik dan vulkanoklastik yang permeabel di dekat permukaan. Vein utama (*major vein*) terletak di tepi dalam kaldera. Setidaknya terdapat 6 (enam) vein utama yang sub-paralel dengan arah NNW-SSE dan kemiringan hampir vertikal (Gambar 13). Vein umumnya memiliki ketinggian terbatas antara 200 dan 300 m. Bijih berkadar tinggi umumnya ditemukan dalam *banded-massive quartz* yang mengandung *disseminated sulfides* atau *thin sulfide-rich band* (biasanya kurang dari 1 cm).

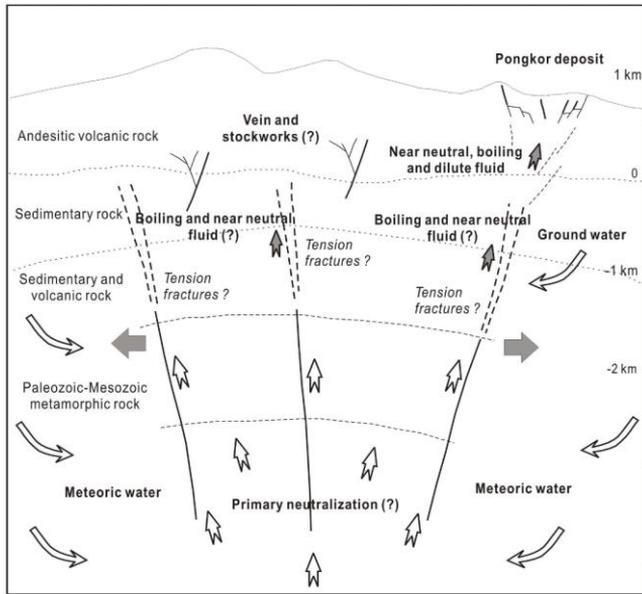


(a)

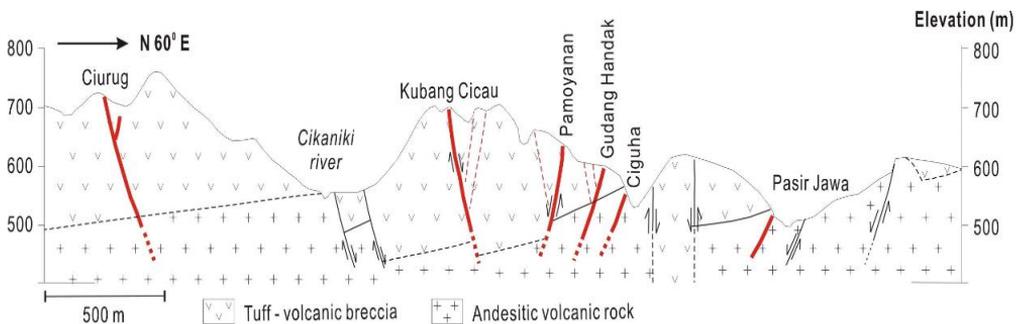


(b)

Gambar 11 (a) Lokasi Endapan Pongkor Au-Ag relatif terhadap busur magmatik Sunda Banda, dan (b) relatif terhadap endapan emas epithermal di Jawa Barat (Dimodifikasi dari Milesi dkk., 1999).



Gambar 12 Skema penampang melintang yang menunjukkan lingkungan geologi dari endapan Pongkor di Kubang Bayah (dimodifikasi dari Carlile dan Mitchell, 1994).

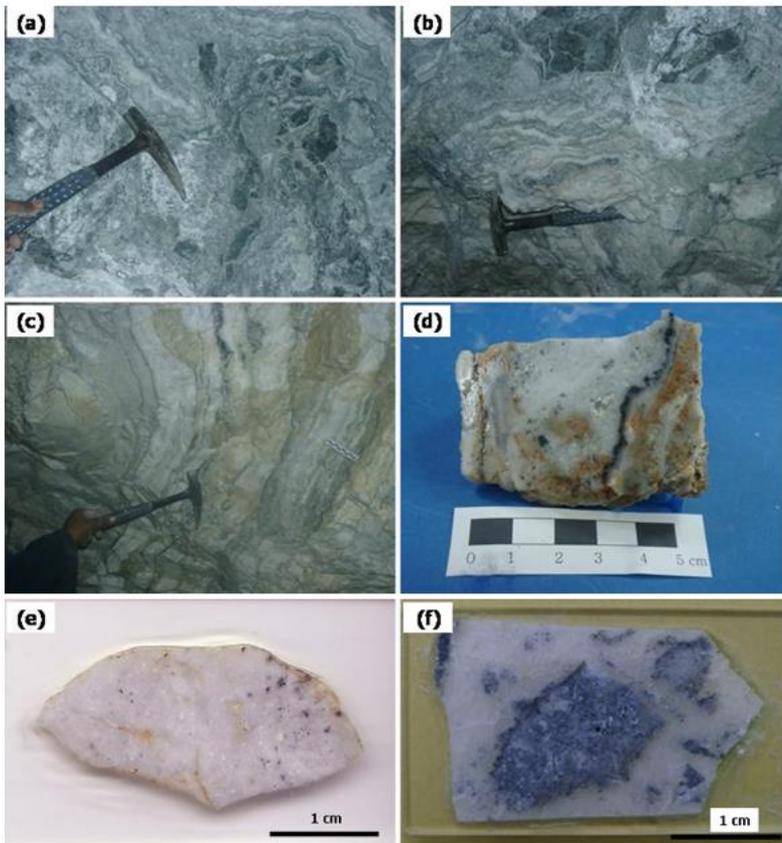


Gambar 13 Penampang SW-NE yang menunjukkan sistem vein pada endapan Pongkor (dimodifikasi dari Basuki dkk., 1994; Milesi dkk., 1999).

5.1.2 Karakteristik Vein

Dalam studi Syafrizal dkk. (2005), breksia yang terhubung dengan *stockwork* atau *veinlet carbonate-quartz* umumnya berkembang di batuan dinding (*footwall* dan *hanging wall*). Tahapan pembentukan vein direpresentasikan oleh karakteristik tekstur *banded*. Vein Ciurug menunjukkan empat tahap pembentukan vein (Gambar 14). (1) Fase *carbonate-quartz* (CQ), umumnya terdapat pada vein Ciurug. Fase ini didominasi oleh *calcite* dan *quartz* dengan tekstur *banded* dan *colloform*, dan kandungan sulfida rendah. (2) Fase *mangan-carbonate quartz* (MCQ), jarang terbentuk pada vein Ciurug. Fase ini ditandai

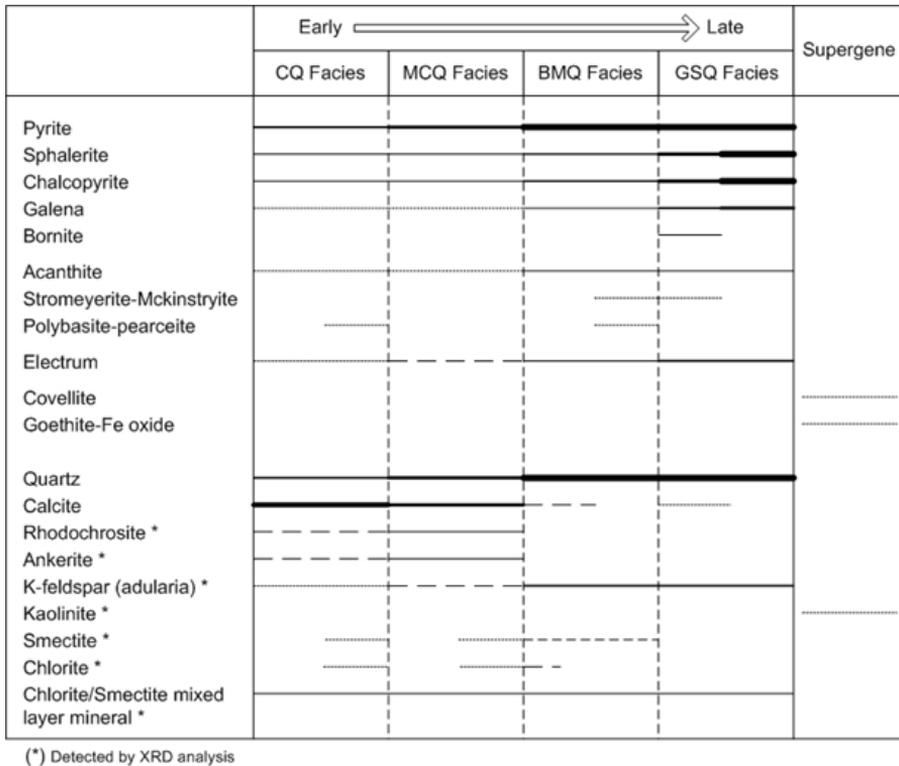
oleh *rhodochrosite*. (3) Fase *banded-massive quartz* (BMQ), yang umum terdapat pada vein Ciurug. Fase ini didominasi oleh vein *quartz* dengan tekstur *banded-massive*. Secara lokal kaya akan lempung, dan biasanya mengandung mineral sulfida yang terdiseminasi. (4) Fase *gray-sulfide quartz* (GSQ), kadang-kadang ini terdapat pada vein Ciurug. Fase ini biasanya kaya mineralisasi emas (kadar tinggi). Fase ini menunjukkan tekstur *massive-banded-colloform* dan kadang-kadang berupa breksi yang kaya lempung.



Gambar 14 Foto yang memperlihatkan representatif tekstur urat dan tahapan pembentukan vein (urat) dan mineraliasi. (a) Tekstur *banded* dan *colloform* urat *quartz-calcite* (CQ-facies) dengan sedikit mengandung *rhodochrosite* dan *ancherite*, umumnya kandungan mineral sulfida rendah. (b) Lapisan tipis *rhodochrosite* yang berwarna pink (MCQ facies) terdapat bersama-sama CQ-facies. (c) Mikrokristalin *milky quartz* dengan tekstur *banded*, *colloform* dan *massive* (BMQ facies), umumnya selalu mengandung mineral sulfida. (d) *Quartz* vein dengan tekstur *massive*, *banded*, *colloform* dan *breccia* serta kaya dengan lempung (BMQ-GSQ facies); mengandung *disseminated* dan *thin-band* mineral sulfida. (e) *Massive quartz* dengan *disseminated sulfide* (BMQ facies). (f). *Massive quartz* dan breksia, mengandung *disseminated quartz* sepanjang batas kontak fragmen batuan (BMQ-GSQ facies). Sumber: Syafrizal dkk., 2005.

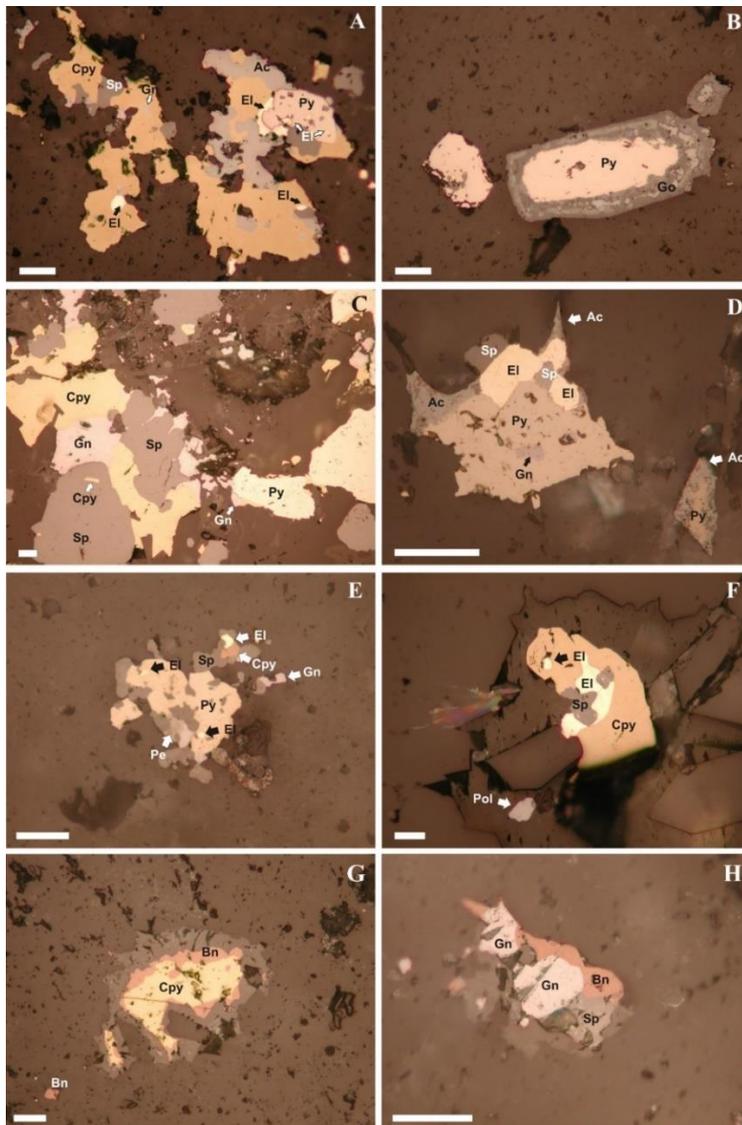
5.1.3 Mineralisasi

Mineral *gangue* utama adalah *quartz* dan *calcite*. Mineral *gangue* lainnya, yaitu *adularia*, mineral lempung (*chlorite*, *illite*, *illite/smectite*, *kaolinite*, dan *smectite*), mineral *carbonate* Ca-Mn-Mg-Fe seperti *rhodochrosite*, *kutnahorite*, dan *ancherite* teridentifikasi melalui analisis X-Ray Diffraction (XRD).



Gambar 15 Paragenesa mineralisasi pada Urat Ciurug. (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).

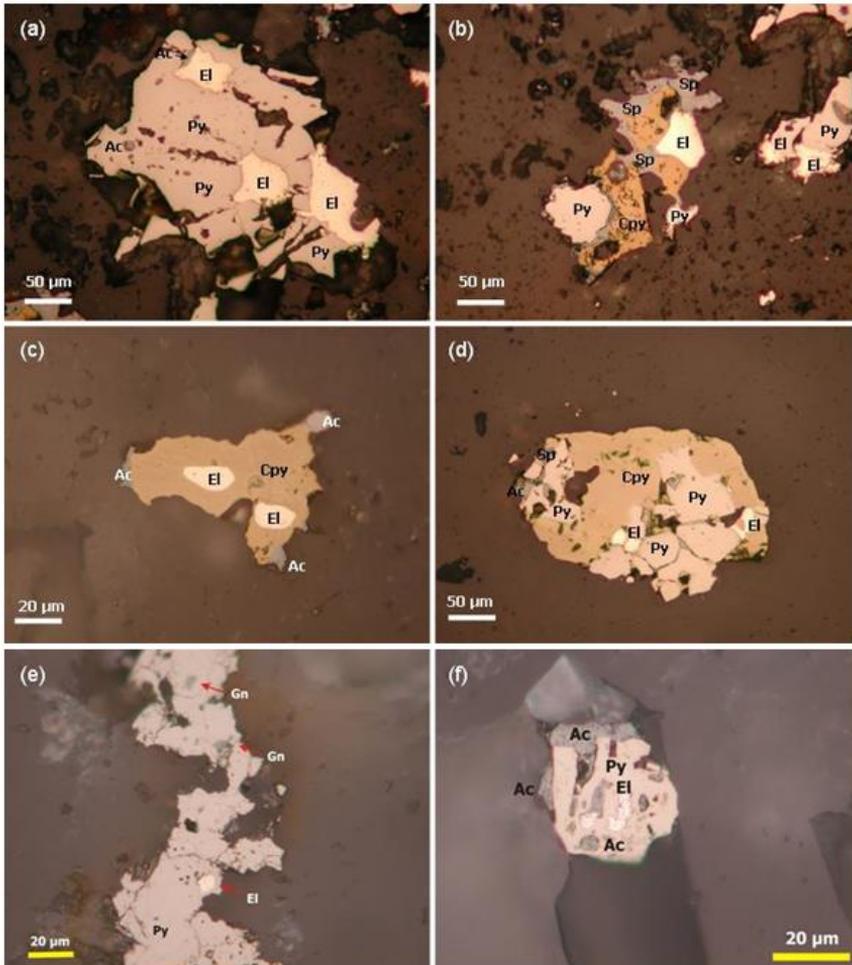
Mineral bijih primer di endapan Pongkor terbentuk dalam vein sebagai butiran sangat halus. Mineral bijih sedikit ditemukan pada tahap awal (fase CQ dan MCQ/MOQ) dan sangat berlimpah pada tahap akhir (fase BMQ dan GSQ). Mineral bijih primer yaitu *pyrite*, *chalcopyrite*, *sphalerite*, *galena*, *electrum*, dan *acanthite*. *Polybasite-pearceite*, *stromeyerite-mckinstryite*, dan *bornite* hadir setempat. *Covellite* dan *goethite* (atau Fe-oksida) terbentuk oleh proses supergen (pelapukan/ oksidasi). Pada Gambar 15 dapat dilihat paragenesa secara umum yang memperlihatkan hubungan tahapan mineralisasi dengan variasi mineral gangue dan mineral logam yang terbentuk. Pada Gambar 16 dapat dilihat variasi mineral logam utama yang terdapat di sistem urat Ciurug (Syafrizal dkk., 2005).



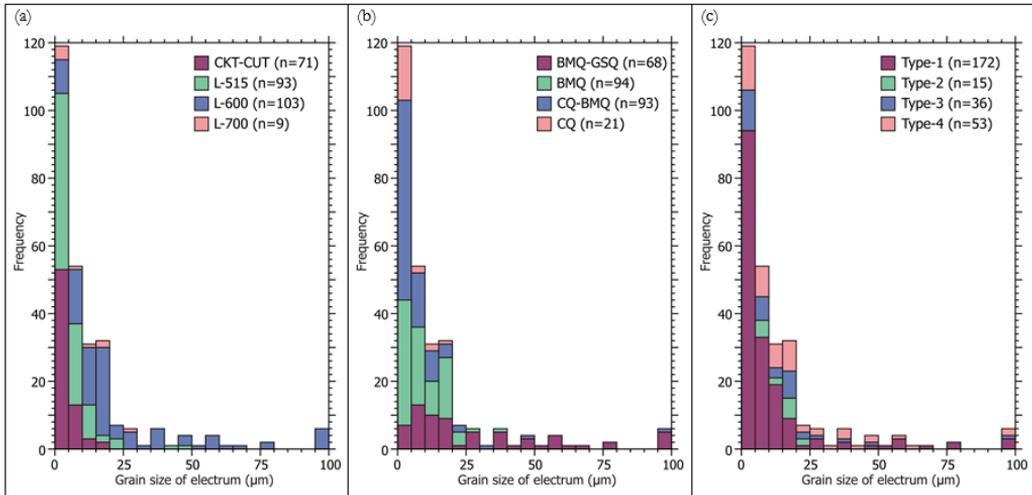
Gambar 16 Fotomikrograf yang memperlihatkan variasi mineral logam yang terdapat di Urat Ciurug. Skala batang = 50 μm . **(A)** Pyrite (Py), sphalerite (Sp), chalcopyrite (Cpy), galena (Gn), acanthite (Ac) dan electrum (El); **(B)** Butiran pyrite euhedral (Py) diselubungi goethite (Go); **(C)** mineral sulfida berbutir kasar. Sphalerite (Sp) mengandung butiran chalcopyrite (Cpy) yang sangat halus; **(D)** Acanthite (Ac) dan electrum (El) bersama dengan sphalerite (Sp) dan pyrite (Py). Galena (Gn) menjadi inklusi dalam pyrite (Py); **(E)** Pearceite (Pe) coexists dengan pyrite (Py) dan sphalerite (Sp) dan mineral sulfida lainnya; **(F)** Polybasite (Pol) sebagai agregat bersama sphalerite (Sp), electrum (El) dan chalcopyrite (Cpy); **(G)** Bornite (Bn) coexists dengan chalcopyrite (Cpy); **(H)** Bornite (Bn) coexists dengan sphalerite (Sp) dan galena (Gn). (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).

Electrum adalah mineral emas utama. Mineral ini terjadi dalam *pyrite* (sebagian besar sebagai inklusi) dan beberapa butiran *electrum* terbentuk

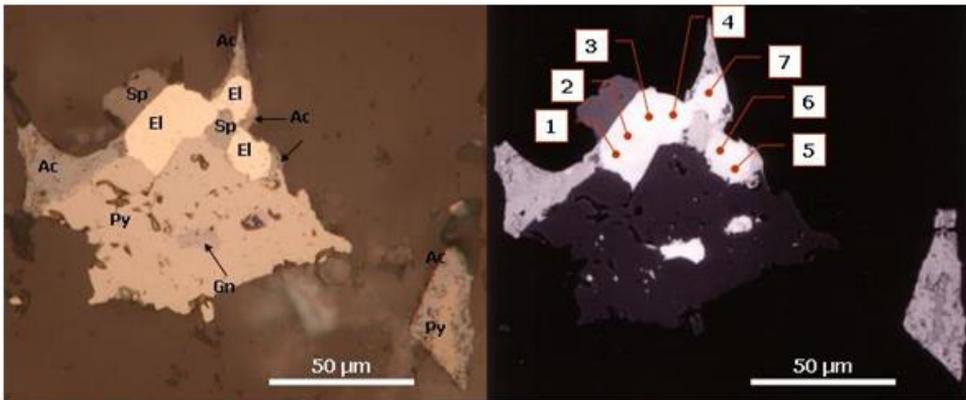
bersama mineral sulfida seperti *pyrite*, *chalcopyrite*, dan *acanthite* (Gambar 17). Secara umum, ukuran butiran *electrum* sebagai inklusi dalam *pyrite* berkisar antara <1 hingga 20 μm . Dalam bijih berkadar tinggi, ukuran butiran *electrum* berkisar antara <20 μm hingga >50 μm yang hadir bersamaan dengan mineral sulfida (Gambar 18). Kandungan emas (Au) dari *electrum* berkisar antara 38 - 52 % atomik (52 - 70 % wt emas) dan sisanya adalah kandungan perak (Ag) sebagaimana terlihat pada Gambar 19 (Syafrizal dkk., 2005).



Gambar 17 Fotomikrograf yang memperlihatkan keterdapat *electrum*. (a) *Electrum* dengan butiran relatif kasar terbentuk bersamaan dengan *pyrite*. (b) *Electrum* terdapat bersamaan (*coexists*) dengan *chalcopyrite*, *sphalerite* dan *pyrite*. (c) *Electrum* dijumpai sebagai inklusi dalam *chalcopyrite*. (d) *Electrum* terbentuk bersamaan dengan mineral-mineral sulfida lain. (e) *Electrum* dengan butiran relatif halus dijumpai sebagai inklusi dalam *pyrite*. (f) *Eletrum* berbutir halus ditemukan bersamaan (*coexist*) dengan *acanthite*. Mineral abbreviations: El, *electrum*; Sp, *sphalerite*; Ac, *acanthite*; Cpy, *chalcopyrite*; Py, *pyrite*; Gn, *galena* (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).

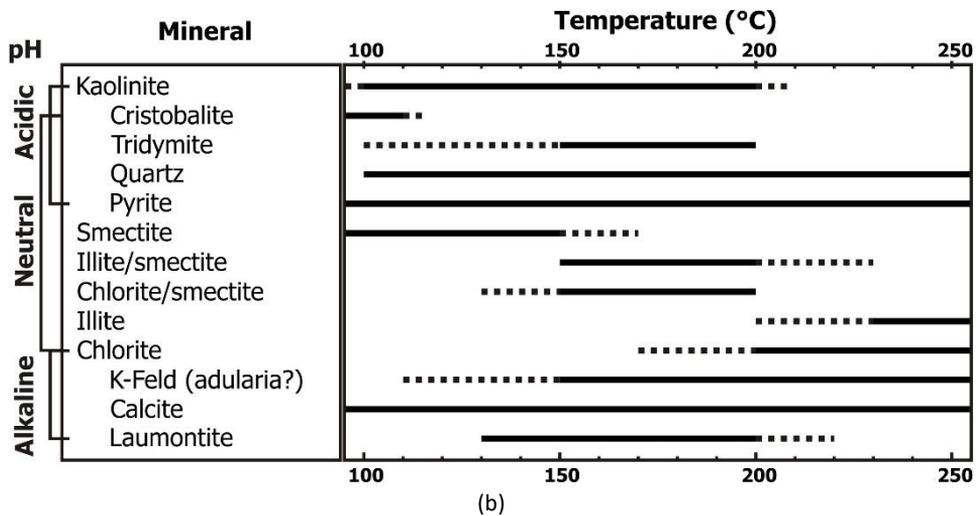


Gambar 18 Histogram yang menunjukkan distribusi ukuran butir *electrum* pada urat Ciurug. (a) Distribusi ukuran butir sesuai dengan lokasi sampel. (b) Distribusi ukuran butir terhadap tahapan mineralisasi. (c) Distribusi ukuran butir sehubungan dengan variasi keterdapatan *electrum*. Tipe-1 (*electrum* muncul sebagai inklusi pada *pyrite*), Tipe-2 (*electrum* muncul sebagai inklusi pada *chalcopyrite*), Tipe-3 (*electrum* muncul berasosiasi dengan *acanthite* ± mineral sulfida lainnya) dan Tipe-4 (*electrum* muncul berdampingan dengan kumpulan mineral *pyrite*, *chalcopyrite*, *sphalerite* ± *galena*) (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).



Point	% Wt			% Atom		
	Au	Ag	Tot	Au	Ag	Tot
1	64.5	35.4	99.9	49.96	50.04	100.00
2	64.1	35.3	99.4	49.86	50.14	100.00
3	65.2	35.2	100.4	50.30	49.70	100.00
4	62.6	35.8	98.4	49.00	51.00	100.00
5	63.0	36.6	99.6	48.50	51.50	100.00
6	63.5	36.5	100.0	48.80	51.20	100.00
7	65.2	33.7	98.9	51.40	48.60	100.00

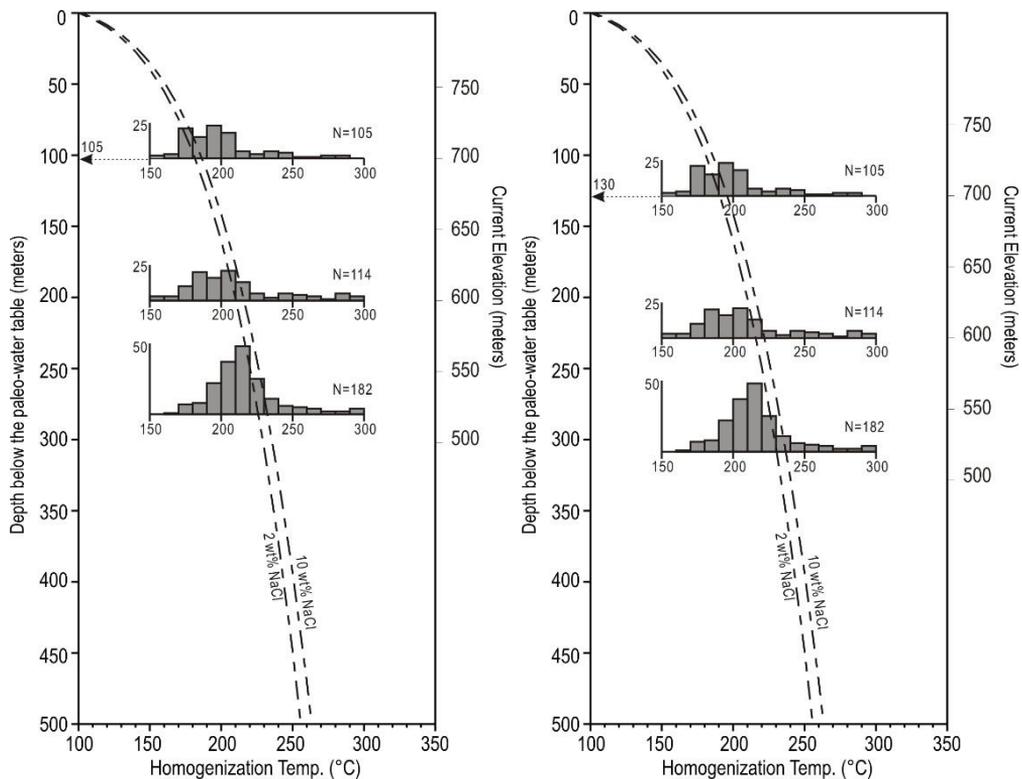
Gambar 19 Perbandingan kandungan Au dan Ag pada butiran *electrum* berdasarkan analisis EPMA (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).



Gambar 20 (a) Diagram skematik yang menunjukkan zona alterasi yang berkembang pada urat Ciurug. Singkatan mineral: Qz, *quartz*; Sm, *smectite*; I/Sm, mineral lapisan campuran *illite-smectite*; Chl/Sm, mineral lapisan campuran *chlorite-smectite*; I, *illite*; Chl, *chlorite*; Ct, *calcite*; Alb, *albite*; K-Feld, kalium feldspar; Lau, *laumontite*. (b) Kisaran stabilitas mineral alterasi hidrotermal yang sensitif terhadap temperatur yang umumnya terjadi pada rangkaian alterasi pH netral (berdasarkan Henley dan Ellis, 1983; Reyes, 1990; Hedenquist dkk., 1996). (Sumber: Syafrizal dkk., 2005).

5.1.4.2 Suhu dan tekanan

Berdasarkan analisis inklusi fluida, semua data suhu minimum cebakan berada dalam rentang 170-230 °C. Mineral asosiasi alterasi hidrotermal menunjukkan suhu maksimum fluida hidrotermal < 240 °C, di mana suhu terendah sekitar < 100 °C. Vein Ciurug menunjukkan kecenderungan peningkatan suhu minimum cebakan di zona kedalaman (170-210 °C pada level 700 m, dan 200-230 °C pada level 515 m; Gambar 21). Berdasarkan data suhu minimum cebakan dari sampel kedalaman dangkal vein Ciurug, Cikoret, dan Ciurug Utara, kedalaman minimum pembentukan vein di bawah paleo-muka air tanah diperkirakan sekitar 90-130 m pada kolom hidrostatik.

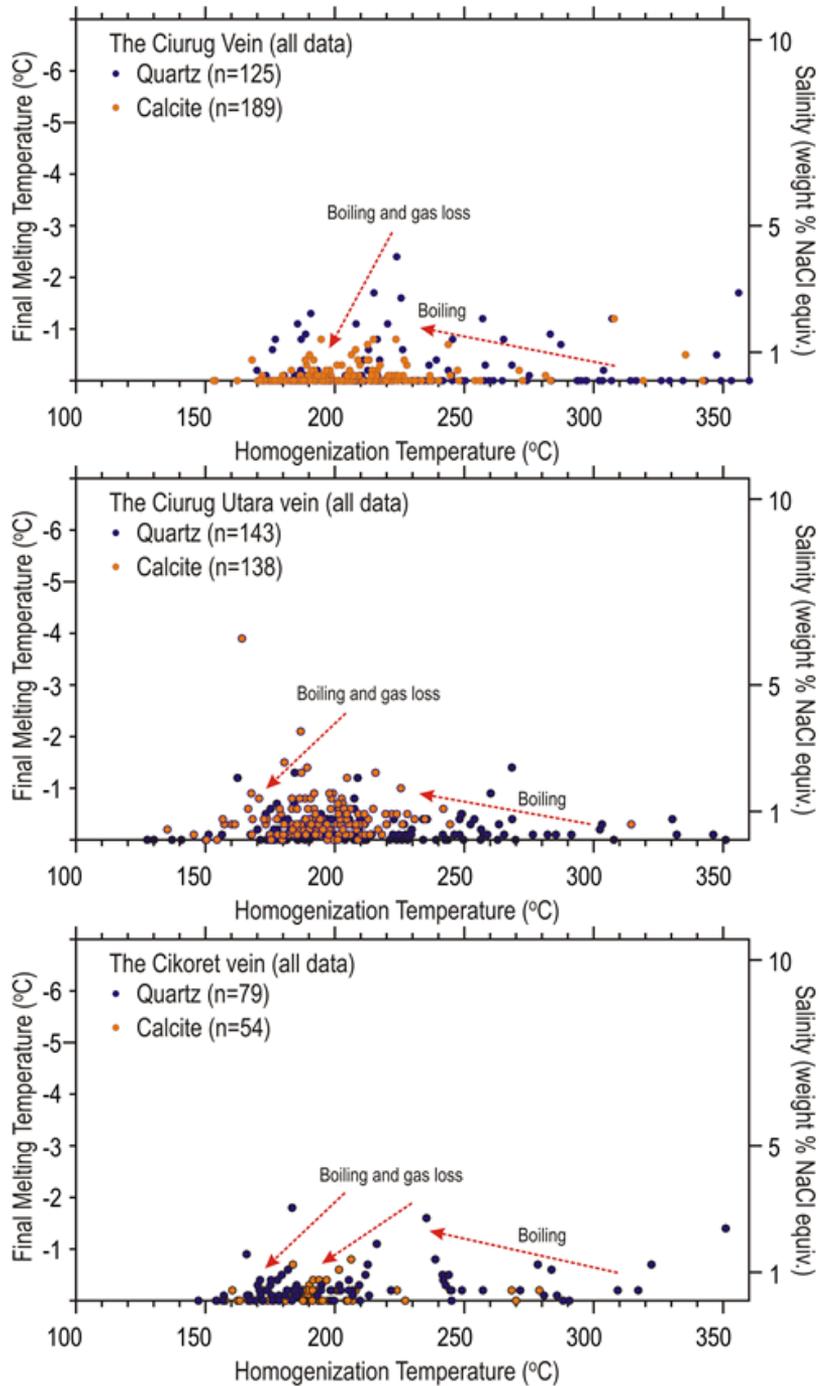


Gambar 21 Prediksi posisi minimum pembentukan urat (vein) di bawah kedalaman paleo-muka air tanah pada kondisi hidrostatik. (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).

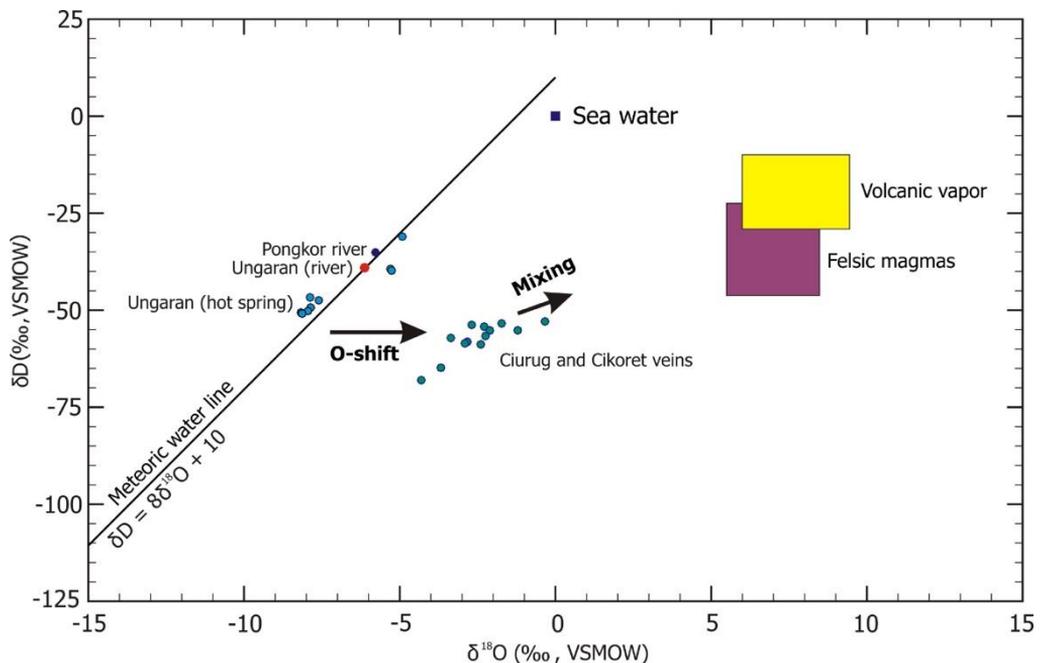
5.1.4.3 Fluida pembentukan bijih

Studi alterasi menunjukkan fluida hidrotermal memiliki pH mendekati netral. Menurut hasil analisis inklusi fluida, zona *precious metal* terbentuk pada suhu homogenisasi 180 - 220 °C dan salinitas rendah (<0,2 wt. % NaCl), sedangkan zona *base metal* terbentuk pada suhu homogenisasi 200 - 230 °C dengan salinitas <3,0 wt. % NaCl (Gambar 22). Karakteristik inklusi fluida menunjukkan adanya proses *boiling* sebagai mekanisme pembentukan bijih.

Data isotop stabil (C, H, dan O) pada vein Ciurug, Cikoret, dan Ciurug Utara menunjukkan bahwa karakter isotop fluida pembentukan bijih tidak berubah signifikan secara temporal maupun spasial selama pembentukan vein. Data isotop hidrogen dan oksigen (Gambar 23) menunjukkan bahwa fluida pembentukan bijih didominasi oleh pencampuran air hidrotermal dan air meteorik serta sirkulasi dalam fluida yang diperkaya ^{18}O (pemindahan oksigen - *oxygen shift*).



Gambar 22 Hubungan antara data Temperatur Homogenisasi (T_h) dan *Melting Point* Es (T_m) pada inklusi fluida dari sampel urat Ciurug dan Cikoret. (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).



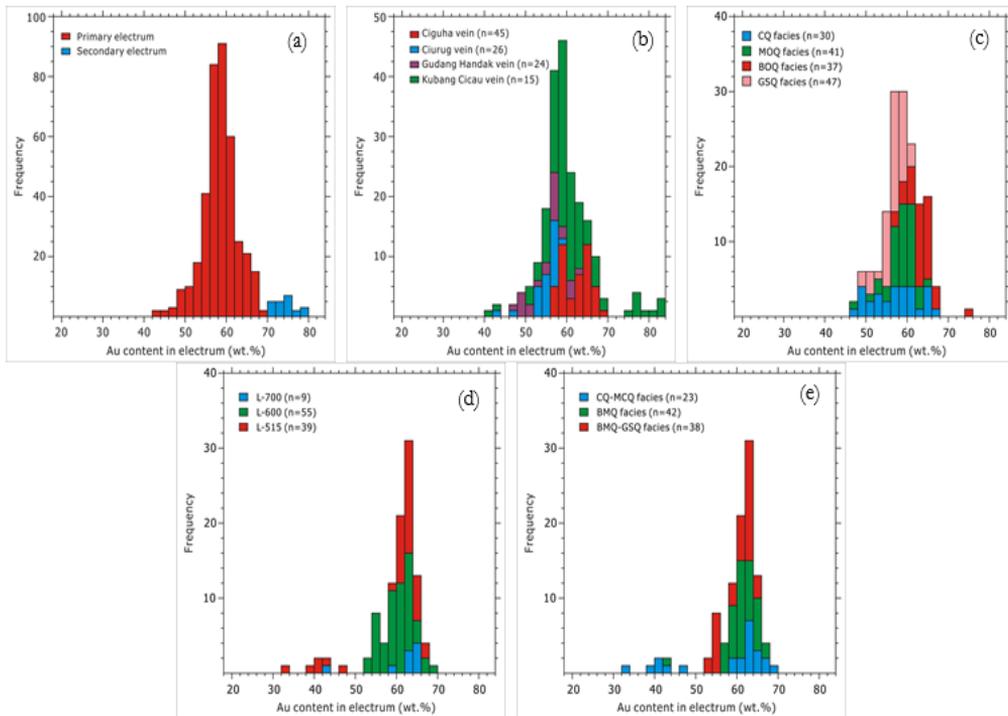
Gambar 23 Diagram hubungan δD dan $\delta^{18}O$ pada air (fluida hidrotermal) yang berasal dari sampel *quartz* urat Ciurug dan Cikoret. Komposisi air meteorik saat ini berasal dari Sungai Pongkor (Rosana dan Matsueda, 2002). Komposisi fluida air meteorik yang kaya (mata air panas) berasal dari daerah Ungaran, Jawa Tengah (Kohno, 2005). (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).

5.1.4.4 Pelapukan dan pengayaan supergen

Erosi dan pelapukan merupakan peristiwa tahap akhir, dan secara lokal berkontribusi pada pengkayaan supergen emas. *Kaolinite* di area permukaan Ciurug-Cikoret mungkin terbentuk sebagai produk pelapukan dan produk alterasi hidrotermal. Ini merupakan produk pelapukan jika terbentuk sebagai bagian utama tanpa adanya alterasi hidrotermal suhu rendah, dan biasanya tersebar di sepanjang punggung topografi. Zona I/Sm, argilik, dan zona propilitik-I/Sm yang terlihat mengindikasikan kemungkinan fluida hidrotermal mencapai area permukaan.

Pengkayaan supergen dari mineralisasi emas (Gambar 24) ditunjukkan oleh keberadaan elektum dengan kadar tinggi (hingga 80 wt. % Au dalam *electrum*), seri *polybasite-pearceite* berasosiasi dengan *covellite*, penggantian *chalcopyrite* oleh *covellite*, dan keterdapatannya *goethite* (atau Fe-oksida), lihat Gambar 24 (b). *Acanthite*-oksidasi besi yang diamati diinterpretasikan sebagai akibat fluktuasi redoks, mungkin dipengaruhi oleh fluktuasi muka air tanah (Griffie dkk., 2002). Beberapa indikator ini juga teramati secara lokal di zona *precious metal* di vein Ciurug (kurang dari 100 meter dari permukaan saat ini).

Griffie dkk. (2002) melaporkan bahwa penggantian mineral primer umumnya diamati sekitar 30 m dari permukaan, dan hanya sebagian diamati pada zona yang lebih dalam (hingga 220 m). Milesi dkk. (1999) juga melaporkan kesimpulan serupa. Mereka mengatakan bahwa pengkayaan supergen erat kaitannya dengan reaksi oksidasi air meteor, yang dikontrol oleh retakan sebagai media infiltrasi air meteorik.



Gambar 24 Histogram menunjukkan diagram frekuensi kandungan Au dalam *electrum* (% berat Au) dari Endapan Au-Ag Pongkor. (a). *Electrum* sekunder dan primer dari urat Kubang Cicau (Griffie dkk., 2002). (b). Kandungan Au dari *electrum* untuk setiap urat utama (Warmada dan Lehman, 2003). (c). Kandungan Au dari *electrum* sehubungan dengan tahapan mineralisasi (Milesi dkk., 1999). (d). Kandungan Au dari *electrum* terhadap elevasi dari Urat Ciurug (Syafriзал dkk., 2007). (e). Kandungan Au dari *electrum* terhadap tahapan mineralisasi dari Urat Ciurug (Syafriзал dkk., 2007).

5.2 Model Deskriptif dan Model Genetik Endapan Au-Ag Pongkor

Berdasarkan penjelasan pada subbab sebelumnya, Model Deskriptif Mineralisasi Emas-Perak (Au-Ag) untuk Endapan Epithermal Gunung Pongkor dapat disusun dan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Model Deskriptif Endapan Au-Ag Epitermal Pongkor (Syafrizal dkk., 2007)

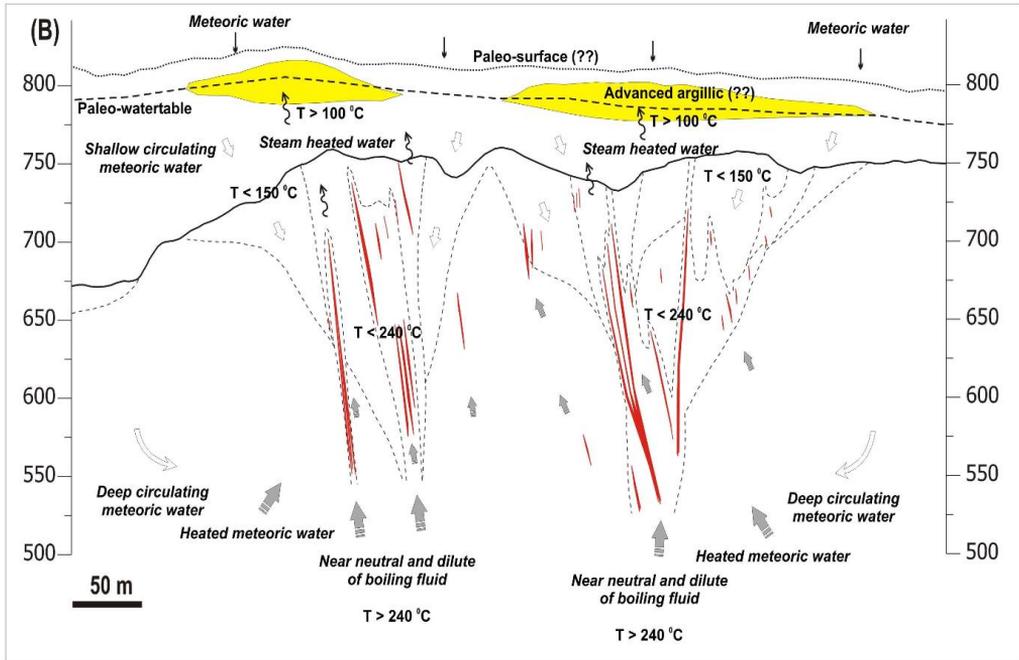
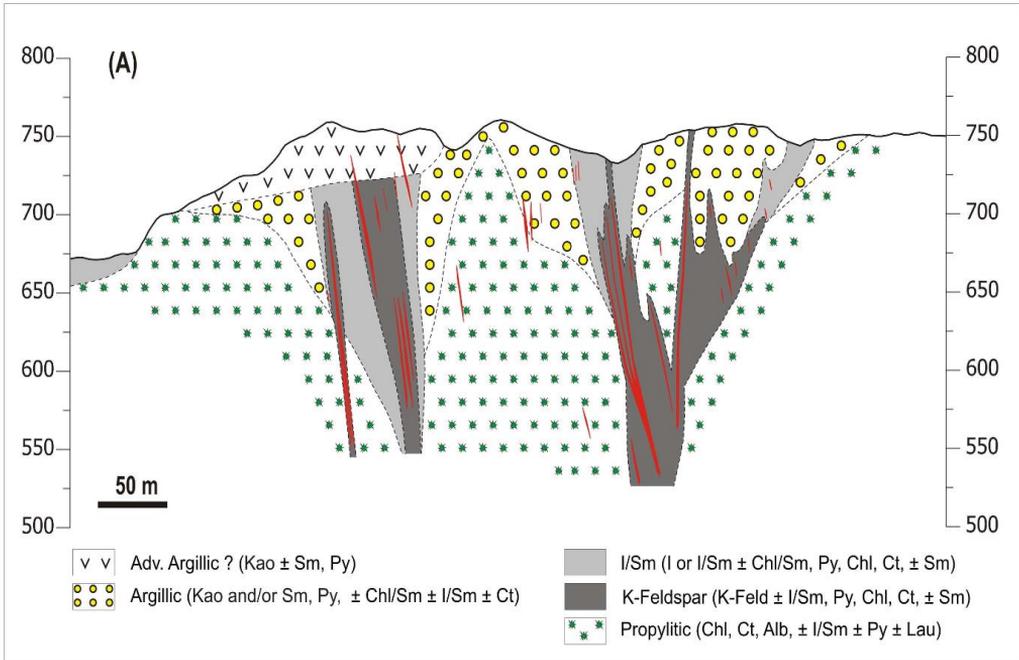
Tatanan Geologi	
<ul style="list-style-type: none"> • Deposit Pongkor terletak di Busur Sunda-Banda sepanjang tepi lempeng Indo-Australia yang tenggelam di bawah lempeng Eurasia. • Pengaruh tektonik (struktural berarah Utara-Selatan) dan sebuah kaldera menciptakan jalan bagi fluida hidrotermal. • Batuan induk terdiri dari batuan vulkanik andesit kalsium-alkali, tufa lapili dan breksi tufa, tufa piroklastik berbutir halus dan <i>siltstone</i> epiklastik, serta lava andesit dengan komposisi basaltik hingga andesit dan berumur Miosen hingga Pliosen. • Sampel adularia menunjukkan bahwa vein yang mengandung mineral terbentuk pada Pliosen Akhir ($2,05 \pm 0,05$ Ma). 	
Ukuran Deposit	
<ul style="list-style-type: none"> • Setidaknya terdapat sembilan vein sub-paralel dengan arah umum NNW-SSE dan kemiringan antara 70-85°. • Ketebalannya antara 2-8 m, bahkan di kedalaman setempat vein Ciurug bisa mencapai 24 m; panjangnya berkisar antara 740 hingga 2700 m sepanjang <i>strike</i>; ketinggian vertikal bijih antara 200 hingga 300 m. • Cadangan bijih adalah 6 juta ton (ketebalan rata-rata 6,9 m; cut off kadar 4 ppm Au), setara dengan >100 ton emas. 	
Karakteristik Endapan	
<ul style="list-style-type: none"> • Silisifikasi meluas di sekitar dinding batuan. Alterasi potasium feldspar dan <i>illite-smectite</i> (I/Sm) melingkupi zona silisifikasi dan vein. Alterasi propilitik mendominasi pada zona kedalaman dan area batas. • Setidaknya, ada empat tahap terbentuknya vein. Vein <i>carbonate-quartz</i> dengan tekstur <i>banded</i> dan <i>colloform</i> (fasies CQ), vein <i>mangan carbonate quartz</i> dengan tekstur <i>banded</i> dan <i>colloform</i> (fasies MCQ), vein <i>quartz</i> bertekstur <i>banded-massive</i> dengan <i>disseminated</i> sulfida berbutir halus (fasies BMQ), dan <i>quartz gray-sulfide</i> dengan tekstur <i>banded</i>, massif, ada breksi lokal, kaya lempung dan adanya <i>thin sulfide-rich band</i> (fasies GSQ). • Dalam skala deposit, fasies CQ dan BMQ sangat umum; fasies MCQ dan GSQ minor. • Mineral <i>gangue</i> umumnya <i>quartz</i> dan <i>calcite</i>; adularia dan mineral lempung minor; <i>carbonate</i> Ca-Mn-Mg-Fe hanya sedikit. • Mineral logam utama adalah <i>pyrite</i>, <i>chalcopyrite</i>, <i>sphalerite</i>, <i>galena</i>, <i>electrum</i>, dan <i>acanthite</i>. <i>Polybasite-pearceite</i>, <i>stromeyerit-mckinstyit</i>, dan <i>bornite</i> hadir secara lokal. <i>Chalcosite</i>, <i>famatinite</i>, <i>hessite</i>, <i>proustite</i>, <i>tetrahedrite</i>, dan <i>uytenbogaardite</i> menjadi mineral penciri. • <i>Covelite</i> dan <i>goethite</i> terbentuk sebagai mineral logam sekunder. • <i>Electrum</i> terbentuk dalam <i>pyrite</i> (sebagian besar sebagai inklusi) dan bersamaan dengan mineral sulfida (terutama <i>pyrite</i>, <i>chalcopyrite</i>, dan <i>acanthite</i>). Kandungan Au dalam <i>electrum</i> berkisar antara 52 - 70 % wt. • Kedalaman minimum pembentukan vein di bawah paleo-muka air tanah adalah sekitar 100 m (kedalaman hidrostatik fluida air mengandung maksimum 2% wt NaCl). • <i>Boiling</i> memberikan kontribusi besar pada mekanisme terbentuknya bijih. • Studi inklusi fluida mengindikasikan suhu pembentukan antara 170 - 230 °C. • Fluida hidrotermal memiliki pH mendekati netral, salinitas rendah (kurang dari 3% wt NaCl), air meteorik mendominasi pada interaksi antara air meteorik dan fluida magmatik. • Pengayaan supergen diindikasikan oleh keberadaan <i>electrum</i> yang sangat halus (hingga 80% wt Au dalam <i>electrum</i>), <i>polybasite-pearceite</i> berasosiasi dengan <i>covelite</i>, penggantian <i>chalcopyrite</i> oleh <i>covelite</i>, keterdapatannya <i>goethite</i> (atau Fe-oksida), dan <i>acanthite</i> muncul dengan tekstur <i>micro-fractures filling</i>. 	
Tren dan zonasi	
<ul style="list-style-type: none"> • Argilik dan alterasi potasium feldspar-I/Sm muncul di permukaan di atas zona mineralisasi. • Mineralisasi kadar tinggi terbentuk dalam fasies BMQ dan GSQ. • Zona vertikal <i>precious metal</i> dan <i>base metal</i>. Zona kaya logam dasar ditandai oleh keberadaan <i>bornite</i>, <i>sphalerite</i> yang berlimpah, <i>chalcopyrite</i> dan <i>galena</i>, penurunan <i>electrum</i>, dan penurunan kandungan Au dalam <i>electrum</i>. Posisi zona yang kaya logam dasar diprediksi pada elevasi di bawah 515 m di atas permukaan laut. • Pengayaan supergen terjadi pada kedalaman dangkal (kurang dari 100 m) dan secara lokal (sebagian) hadir pada zona yang lebih dalam. • Pengayaan supergen kemungkinan disebabkan oleh oksidasi air meteorik dan dikendalikan oleh struktur (retakan). Ini berarti pengayaan supergen harus memiliki hubungan erat dengan zona oksida mangan. 	

Studi alterasi secara detail dan sistematis pada vein Cikoret dan Ciurug Utara menyajikan model untuk proses mineralisasi. Model ini mungkin dapat

mencerminkan asal-usul mineralisasi dalam skala deposit (endapan Pongkor), karena hampir semua vein dalam sistem endapan Pongkor menunjukkan karakteristik yang serupa. Perilaku fluida pembentuk bijih, posisi paleo-muka air tanah, dan kondisi pemanasan juga diadopsi dari studi mikrotermometri dan isotop stabil pada vein Ciurug. Studi mikrotermometri inklusi fluida menunjukkan bahwa mekanisme dominan pembentukan emas dan perak pada vein Ciurug-Cikoret adalah pemanasan air pada suhu tinggi. Campuran antara air panas dan dingin serta campuran antara fluida yang bersirkulasi yang kaya isotop ^{18}O diajukan sebagai mekanisme tambahan untuk pembentukan *precious metal* pada endapan Pongkor.

Mineralisasi primer pada vein Ciurug-Cikoret dihasilkan oleh sistem geotermal. Alterasi potasium-feldspar, I/Sm, dan alterasi propilitik di sekitar vein menunjukkan bahwa struktur yang ada menciptakan jalan yang memfokuskan fluida hidrotermal (Gambar 25). Dari studi inklusi fluida dan alterasi, komposisi fluida tersebut memiliki pH mendekati netral dan cair. Komposisi fluida ini mengindikasikan bahwa fluida mineralisasi membentuk endapan epitermal sulfidasi rendah (misalnya, Hedenquist dkk., 2000) atau endapan epitermal *adularia-sericite* (Heald dkk., 1987).

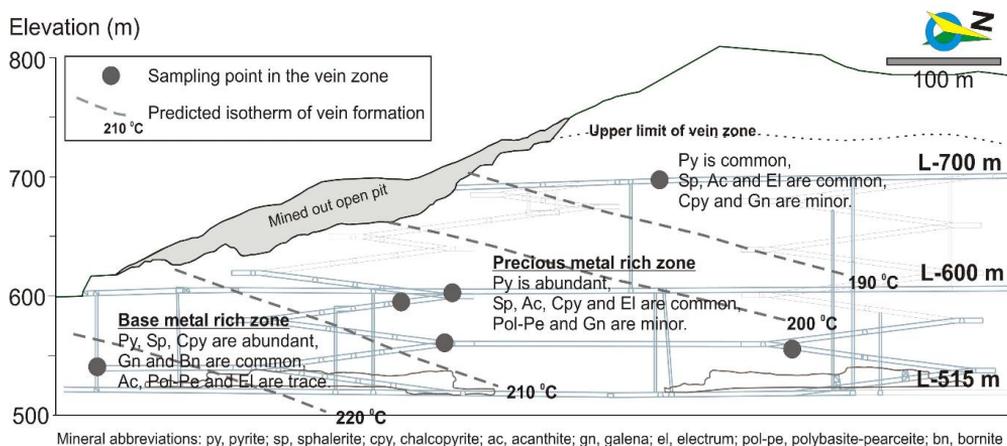
Distribusi alterasi *sericite*-argilik dan *chlorite* dan/ atau *illite*, *calcite*, *albite* ± *illite*/ *smectite* ± mineral k-feldspar di permukaan area Ciurug, Ciurug Utara, dan Cikoret menunjukkan bahwa zona *steam-heated* terjadi di daerah ini. Keberadaan kristobalit dan tridimit di permukaan juga mendukung asumsi ini. Fluida hidrotermal yang mampu membawa konsentrasi emas tinggi pada suhu di bawah 300 °C adalah fluida yang kandungan H_2S terlarutnya tinggi bersama dengan CO_2 (Hedenquist dan Henley, 1985). Kondisi pemanasan ada di endapan Pongkor. Oleh karena itu, aliran kontinu dari fluida yang mendidih ke dalam struktur menghadirkan mineralisasi emas dalam lingkungan epitermal (misalnya, Hedenquist dan Henley, 1985). Selama aktivitas geotermal tahap akhir, air asam dangkal melewati retakan, dan dalam hal ini menghasilkan *kaolinite*. Proses ini membentuk jalur yang *permeabel* yang kemudian mempengaruhi kedalaman oksidasi dan pengayaan supergen. Erosi dan pelapukan mewakili peristiwa tahap akhir dan menyebabkan erosi saat ini. Model genetik pembentukan endapan Au-Ag Pongkor ini dapat dilihat pada Gambar 25.



Gambar 25 Penampang yang menunjukkan genesis vein Cikoret dan Ciurug Utara. (A) Sistem vein dan zona alterasi pada vein Cikoret dan Ciurug Utara berdasarkan sampel inti bor (CKT-02, CKT-03, CUT-01A dan CUT-01C). (B) Model yang diusulkan untuk model genetik proses pembentukan vein. Sumbu vertikal dalam meter (Sumber: Syafrizal dkk., 2007).

Berdasarkan studi pada asosiasi mineral bijih pada vein Ciurug, Cikoret, dan Ciurug Utara, zona vertikal mineral yang kaya akan *precious metal* dan *base metal* teridentifikasi (Gambar 26). Zona *precious metal* ditandai oleh *sphalerite* umum, *chalcopyrite*, *electrum*, *acanthite*, *polybasite-pearceite*, dan *galena* minor. Zona kaya logam dasar ditandai oleh keberadaan *bornite*, *sphalerite* berlimpah, *chalcopyrite* dan *galena*, *electrum* yang lebih sedikit, dan penurunan kandungan Au dalam *electrum*. Warmada dan Lehman (2003) juga mencatat adanya peningkatan kehadiran mineral *base metal* (terutama *chalcopyrite* dan *galena*) pada zona lebih dalam.

Berdasarkan interpretasi dan penjelasan di atas, maka Model Endapan (Deposit Model) untuk mineralisasi Pongkor dapat dikonstruksi dan dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26 Penampang memanjang model endapan untuk Urat Ciurug yang menunjukkan zonasi mineral berdasarkan studi mineralogi dan mikrotermometri (Syafrizal dkk., 2007).

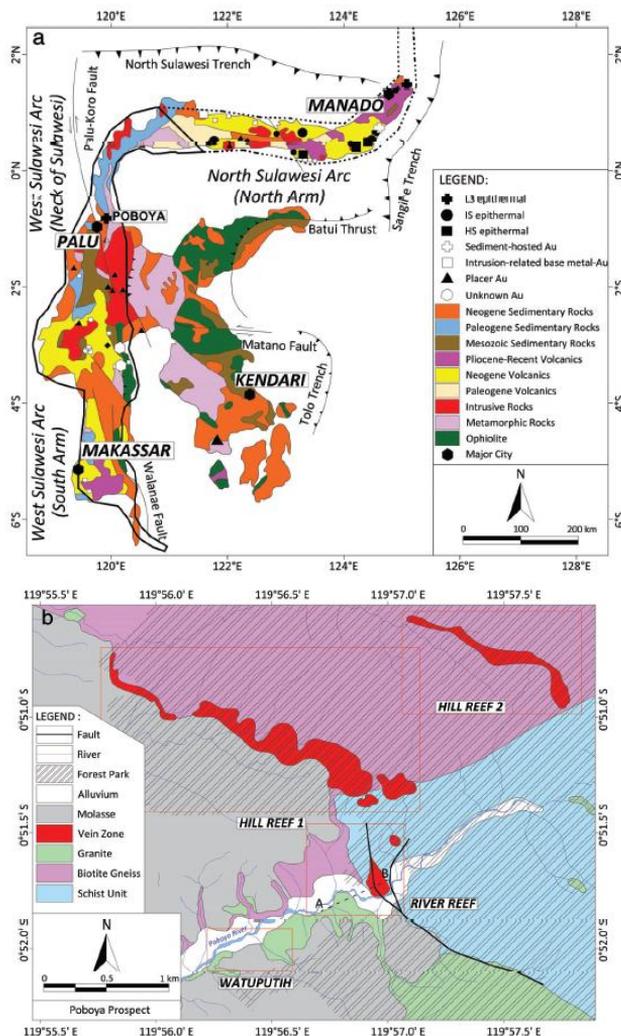
5.3 Implikasi Terhadap Eksplorasi

Berdasarkan mineralogi, kadar dari vein yang termineralisasi (*electrum*) sangat erat hubungannya dengan fasies vein (*quartz* dan tekstur). Distribusi (tebal dan kelimpahan) fasies BMQ dan GSQ sangat tidak teratur. Fakta ini akan memengaruhi kadar. Keberadaan zona *base metal* pada kedalaman 515 m di vein Ciurug sebaiknya diselidiki lebih lanjut, serta pengaruhnya terhadap desain tambang dan evaluasi ekonomi. Berdasarkan mineralogi bijih, kandungan *electrum* pada Cikoret relatif lebih rendah daripada vein Ciurug Utara. Mineralisasi logam dasar (*chalcopyrite*, *sphalerite*, dan *galena*) mendominasi pada vein Cikoret di kedalaman dangkal.

Untuk lebih memahami durasi pembentukan vein, posisi paleo-permukaan, paleo-hidrologi dari sistem hidrotermal dan zona mineralisasi (logam), diperlukan studi geo-kronologi, studi alterasi, dan studi inklusi fluida dengan sampel sistematis pada skala deposit. Beberapa indikator, seperti korelasi antara potassium-feldspar dan zona alterasi I/Sm (*illite-smectite*) dengan zona vein yang termineralisasi, elektum dan mineral perak yang terbentuk dalam vein *quartz*, serta mineralisasi berkadar tinggi terbentuk dalam fasies BMQ-GSQ sebagai *disseminated sulfides* berbutir halus dan/ atau *sulfide-rich band*, hal ini menjadi sangat penting dalam eksplorasi. Di sisi lain, karena distribusi bijih tidak merata, maka diperlukan pengambilan sampel secara sistematis.

6. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK PROSPEK EMAS-PERAK POBOYA – PALU

Prospek emas Poboya terletak sekitar 12 km di sebelah timur laut Kota Palu. Prospek emas Poboya terletak di bagian tengah Provinsi Sulawesi Barat, yang merupakan bagian dari batas benua Sundaland (Gambar 27(a)). Mineralisasi emas di prospek ini terdiri tiga zona urat, yaitu River Reef Zone/RRZ, Hill Reef Zone 1/HRZ-1, dan Hill Reef Zone 2/HRZ-2 (Gambar 27(b)).

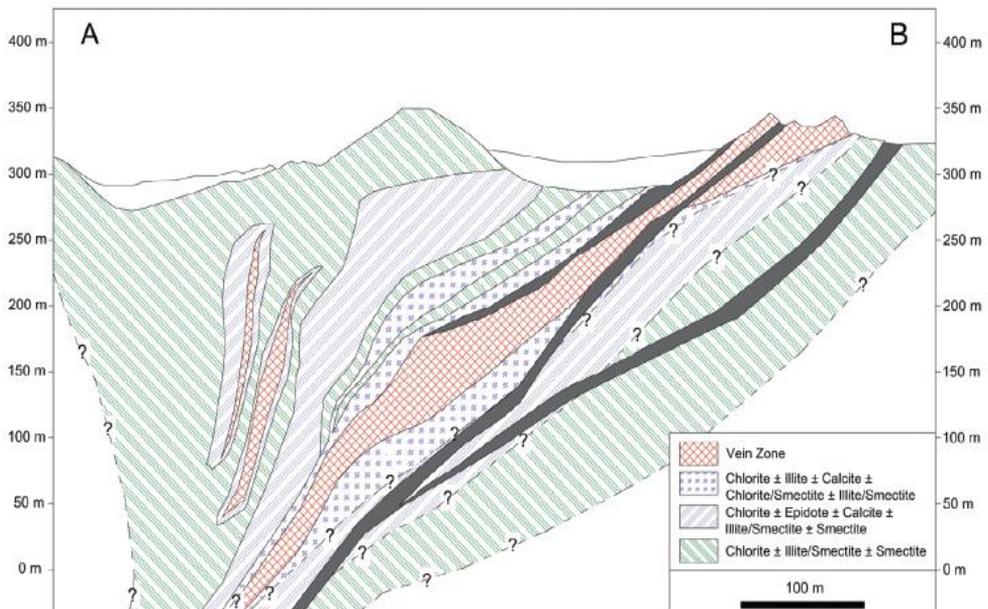


Gambar 27 (a) Peta geologi Sulawesi yang menunjukkan distribusi endapan emas, tersebar di Barat dan Utara busur Sulawesi yang didominasi oleh batuan metamorfik dan vulkanik. (b) Peta geologi daerah Prospek Poboya (Sumber : Rivai dkk., 2019).

6.1 Deskripsi Prospek Poboya

Urut-urut *quartz-carbonate* yang memotong batuan induk di RRZ menunjukkan beberapa tekstur yang merupakan karakteristik dari endapan epitermal bersulfidasi rendah (*Epithermal Low Sulphidation*). Tekstur tersebut meliputi *colloform-crustiform banding*, *bladed calcite*, kalsedon masif, dan *comb quartz texture*. Terjadinya breksiasi menunjukkan adanya injeksi cairan hidrotermal yang berulang-ulang. Mineralisasi dengan kadar emas tinggi dijumpai pada hadirnya alur tipis keabu-abuan yang membawa mineral sulfida pada urat *quartz-calcite*.

Alterasi hidrotermal di RRZ Alterasi hidrotermal di RRZ memiliki zonasi yang didelineasi berdasarkan kedekatan saluran fluida utama. Zonasi ubahan hidrotermal dimulai dari zona propilitik dalam yang terdiri atas *chlorite*, *illite*, *chlorite/smectite*, *illite/smectite*, dan *calcite*, kemudian diikuti oleh zona propilitik T tinggi yang terdiri dari *chlorite*, *epidote*, *calcite*, *illite/smectite*, dan *calcite* (Syafriзал dkk., 2017). Zona terluar, zona propilitik T rendah, terdiri atas *chlorite*, *illite/smectite*, dan *smectite*. Di permukaan, ubahan hidrotermal terdiri dari zona propilitik T rendah (Gambar 28).

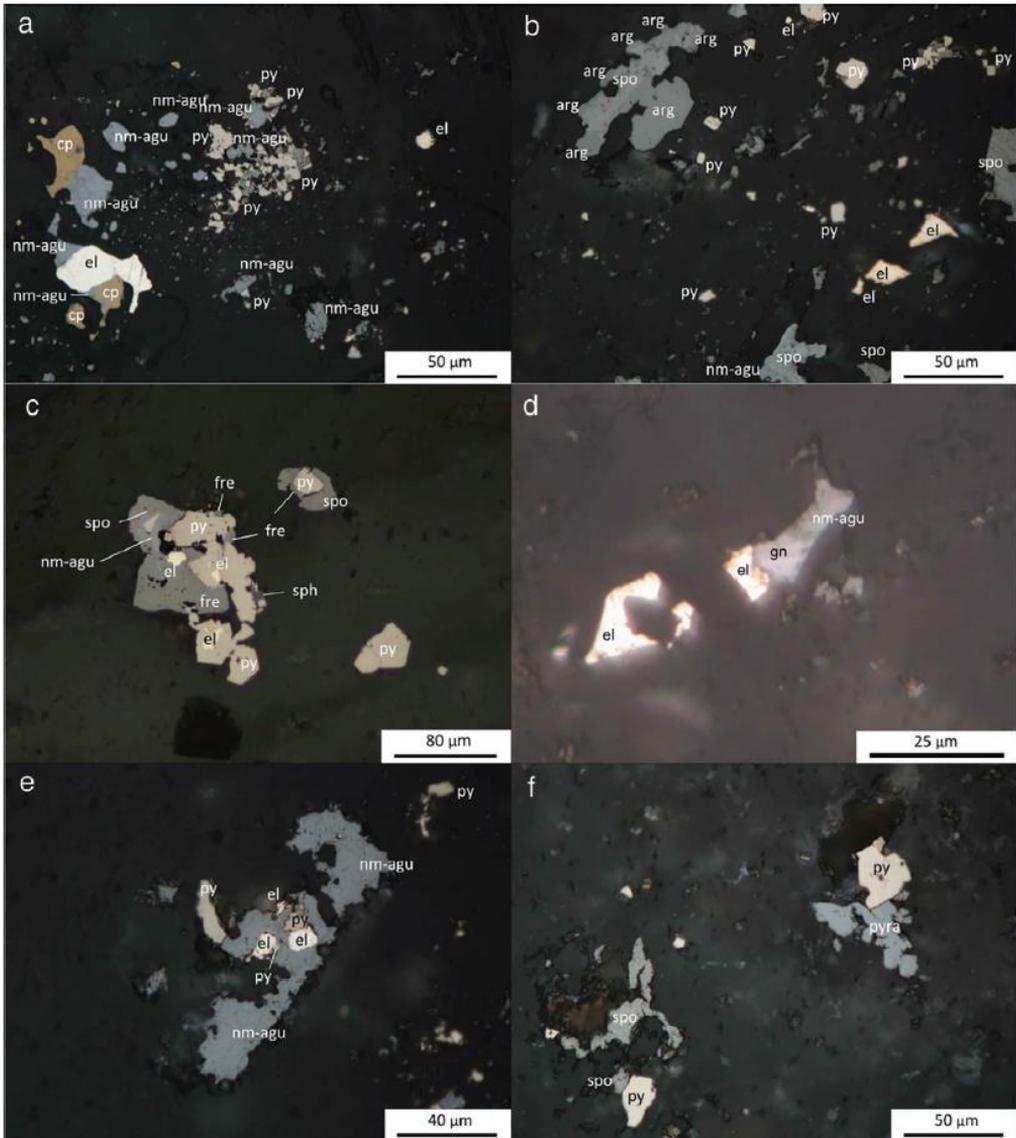


Gambar 28 Zona alterasi hidrotermal pada RRZ (Syafriзал dkk., 2017).

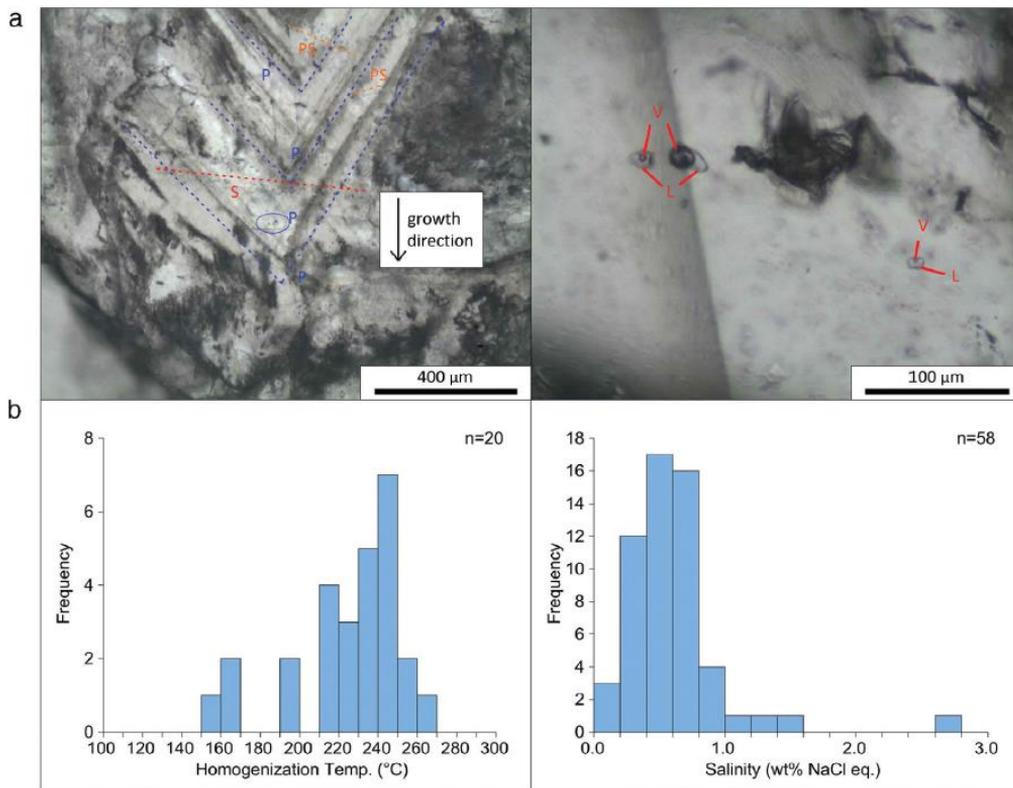
Mineral bijih yang teridentifikasi di RRZ termasuk electrum, naumannite-aguilarite, argyrodite, pirargirite, selenopolybasite, freibergite, chalcopyrite, sphalerite, galena, pyrite, marcasite, dan pyrrhotite (Gambar 29). Electrum adalah mineral pembawa Au yang paling menonjol dan sebagian besar terjadi sebagai butiran bebas. Mineral ini memiliki hubungan yang sederhana dengan mineral bijih lainnya, seperti naumannite-aguilarite, selenopolybasite, freibergite, chalcopyrite, sphalerite, dan pyrite. Electrum juga teramati sebagai inklusi pada pyrite, naumannite-aguilarite, chalcopyrite, dan intergrowth dengan naumannite-aguilarite, freibergite dan selenopolybasite (Gambar 29). Ukuran electrum hingga 50 μm .

Pengendapan mineral bijih di RRZ dibagi menjadi tahap awal dan tahap akhir. Tahap awal ditandai dengan kumpulan mineral bijih yang terdiri dari *electrum*, *naumannite-aguilarite*, *chalcopyrite*, *pyrite*, *marcasite*, *sphalerite*, dan *pyrrhotite* yang tertanam dalam *quartz*. Tahap ini diakhiri oleh urat-urat *quartz-calcite* yang *barren*. Tahap akhir ditandai dengan lebih banyak variasi mineral bijih yang terdiri dari *electrum*, *naumannite-aguilarite*, *selenopolybasite*, *freibergite*, *sphalerite*, *pyrite*, *marcasite*, *argyrodite*, *chalcopyrite*, dan *galena*. Mineral bijih ini diendapkan bersama dengan *quartz* dan *calcite* dan diakhiri oleh pengendapan *quartz* mikrokristalin dan *pyrite*. Sebagian besar mineral pembawa Ag diendapkan setelahnya *electrum* dan *pyrite*.

Analisis inklusi fluida dilakukan pada inklusi fluida yang terjebak (hosted) dalam *calcite* yang berasosiasi dengan mineral bijih (*electrum*, *naumannite-aguilarite*, *argyrodite*, *selenopolybasite*, *pyrargyrite*, *freibergite*, *sphalerite*, *galena*, dan *pyrite*) pada tahap akhir mineralisasi. Titik leleh akhir inklusi fluida (T_m) memiliki rentang dari -0.1° to -1.5°C , dan modulus pada interval $0.0^\circ - 0.4^\circ \text{C}$ atau setara dengan 0.1–2.6 wt% NaCl dan 0.3–0.7 wt% NaCl. Sementara itu, suhu homogenisasi (T_h) berada dalam rentang $150 - 270^\circ \text{C}$ dengan modulus pada interval from 240 – 250 $^\circ\text{C}$ (Gambar 30).



Gambar 29 (a) Fotomikrograf *electrum*, *naumannite-aguilarite*, *chalcopyrite* yang mengandung Ag, dan *pyrite* pada tahap awal; (b) butiran bebas *electrum* dan hubungan butiran yang tidak merata antara *selenopolybasite*, *argyrodite*, dan *naumannite-aguilarite* pada tahap akhir; (c) inklusi *electrum* pada *pyrite* dan pertumbuhan bersama antara *naumannite-aguilarite*, *selenopolybasite*, dan *freibergite* dengan kemunculan kecil *sphalerite* pada tahap akhir; (d) butiran bebas *electrum* dan kontak timbal balik sederhana antara *naumannite-aguilarite* dan *galena* pada tahap akhir; (e) inklusi *electrum* dan *pyrite* pada *naumannite-aguilarite* pada tahap awal; (f) koeksistensi *pyrrargyrite*, *selenopolybasite*, dan *pyrite* pada tahap akhir. *Mineral abbreviations*: arg, *argyrodite*; cp, *chalcopyrite*; el, *electrum*; fe, *freibergite*; gn, *galena*; mc, *marcasite*; nm-agu, *naumannite-aguilarite*; po, *pyrrhotite*; py, *pyrite*, *pyrrargyrite*; sp, *sphalerite*; spo, *selenopolybasite*. (Sumber : Rivai dkk., 2019).



Gambar 30 (a) Fotomikrograf yang menunjukkan inklusi fluida primer di zona pertumbuhan *calcite* yang dipotong oleh inklusi fluida pseudosekunder dan sekunder. Inklusi yang kaya cairan dan uap ada bersamaan. (b) Distribusi data suhu homogenisasi dan salinitas inklusi fluida *calcite* tahap akhir di River Reef Zone. Singkatan: P, *primary*; PS, *pseudosecondary*; S, *secondary*; L, *liquid*; V, *vapor* (Sumber : Rivai dkk., 2019).

6.2 Implikasi Terhadap Eksplorasi

Kenampakan tekstur urat dan komposisi mineralogi bijih pada deposit RRZ sesuai dengan karakteristik endapan *Epithermal Low Sulphidation* (Dong dkk., 1995; Simmons dkk., 2005). Demikian juga, hasil mikrotermometri inklusi fluida di RRZ ($T_h = 240-250^\circ$, salinitas = 0,3-0,7 wt% NaCl) sesuai dengan kisaran suhu dan salinitas yang umum untuk fluida pembentuk bijih pada lingkungan epitermal (Wilkinson, 2001). Urat *quartz-carbonate* di RRZ menunjukkan pertumbuhan primer, rekristalisasi, dan tekstur pengganti, seperti *massive*, *micro-comb*, *moss*, *colloform*, *crustiform*, *mosaic*, *feathery*, *flamboyant*, *lattice bladed*, *ghost bladed*, *parallel bladed*, dan *saccharoidal*. Tekstur-tekstur ini mencerminkan pengendapan awal silika amorf, transformasinya menjadi fase yang lebih stabil, dan *boiling*. Urat *quartz-*

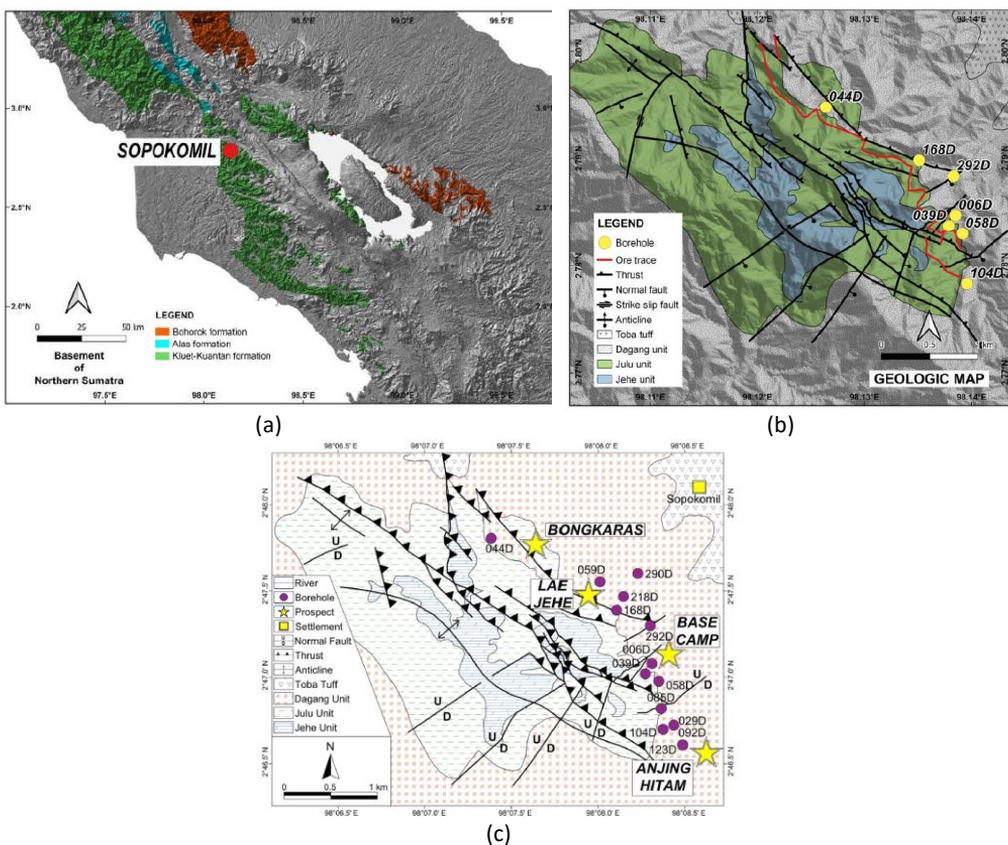
carbonate termineralisasi mengandung *electrum*, *naumannite-aguilarite*, *chalcopyrite*, *sphalerite*, *galena*, *pyrite*, *marcasit*, dan *pyrrhotite* yang diendapkan pada tahap awal. Selain *pyrrhotite*, urat-urat mineralisasi menjadi *hosted* bagi mineral-mineral ini bersama dengan *selenopolybasite*, *freibergite*, *argyrodite*, dan *galena* yang diendapkan pada tahap akhir.

Dengan adanya beberapa indikasi keterdapatan endapan emas plaser di sepanjang *transcurrent* (sistem sesar dengan pergerakan lateral atau horizontal antara dua blok) PKFZ (Poboya Komplek Fault Zone) yang berfungsi sebagai jalur fluida hidrotermal (van Leeuwen & Pieters, 2011) dan adanya deposit RRZ mengimplikasikan bahwa daerah di sekitar PKFZ merupakan daerah yang potensial untuk dieksplorasi sebagai deposit epitermal.

7. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN SENG – TIMBAL PROSPEK SOPOKOMIL

7.1 Deskripsi Endapan Zn-Pb Sopokomil.

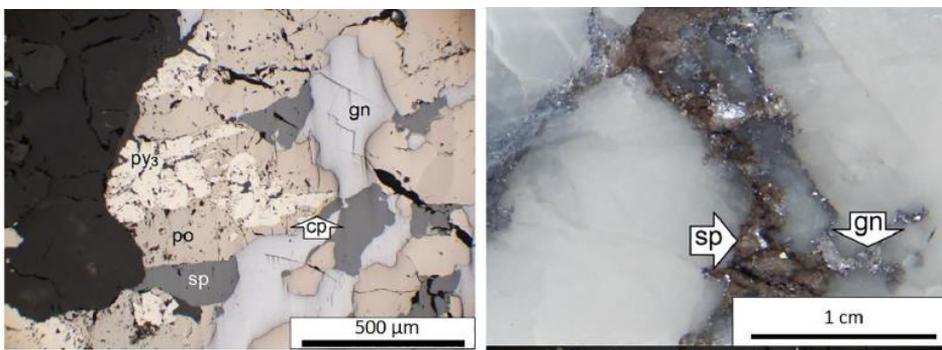
Endapan Dairi Zn + Pb + Ag (Endapan Sopokomil) merupakan satu-satunya deposit SEDEX besar hingga saat ini yang telah ditemukan di Sumatra. Endapan Zn-Pb Sopokomil merupakan satu-satunya deposit sulfida masif (*shale-hosted massive sulfide*, SHMS) yang ditemukan di Sumatra, Indonesia hingga saat ini. Lokasi Endapan Sopokomil ini dapat dilihat pada Gambar 31 (a). Endapan sedimen ekshalasi (SEDEX) dianggap sebagai salah satu sumber Zn dan Pb yang paling penting. Secara umum, rata-rata endapan SEDEX mengandung 6,8 wt% Zn, 3,3 wt% Pb, dan 63 g/t Ag.



Gambar 31 (a) Peta lokasi Prospek Sopokomil, (b) Peta Geologi, dan (c) Lokasi Endapan SEDEX Utama. (Sumber: Rivai dkk., 2020; 2021).

Endapan Zn+Pb+Ag Dairi berada di dalam formasi sedimen Paleozoikum di bagian utara Sumatra (Crow dan van Leeuwen, 2005) yang dianggap sebagai dasar dari pulau tersebut (Barber dan Crow, 2003). Dalam hal struktur geologi, endapan Zn + Pb + Ag Dairi dikontrol secara jelas oleh antiklin berarah NW-SE, yang memotong bagian tengah Kubah Sopokomil. Sesar-sesar pada endapan tersebut memiliki tren dalam dua arah yang dominan: Sesar naik NW-SE dan sesar normal SW-NE (Rivai dkk., 2020). *Orebodies* dalam deposit Dairi Zn + Pb + Ag di-host oleh unit Julu dan Jehe yang terdiri atas prospek Anjing Hitam, Basecamp, Lae Jehe, dan Bongkaras yang membentang hampir 4 km dari Tenggara ke Barat Laut di sisi timur Kubah Sopokomil (Gambar 31 (b) dan Gambar 31 (c)).

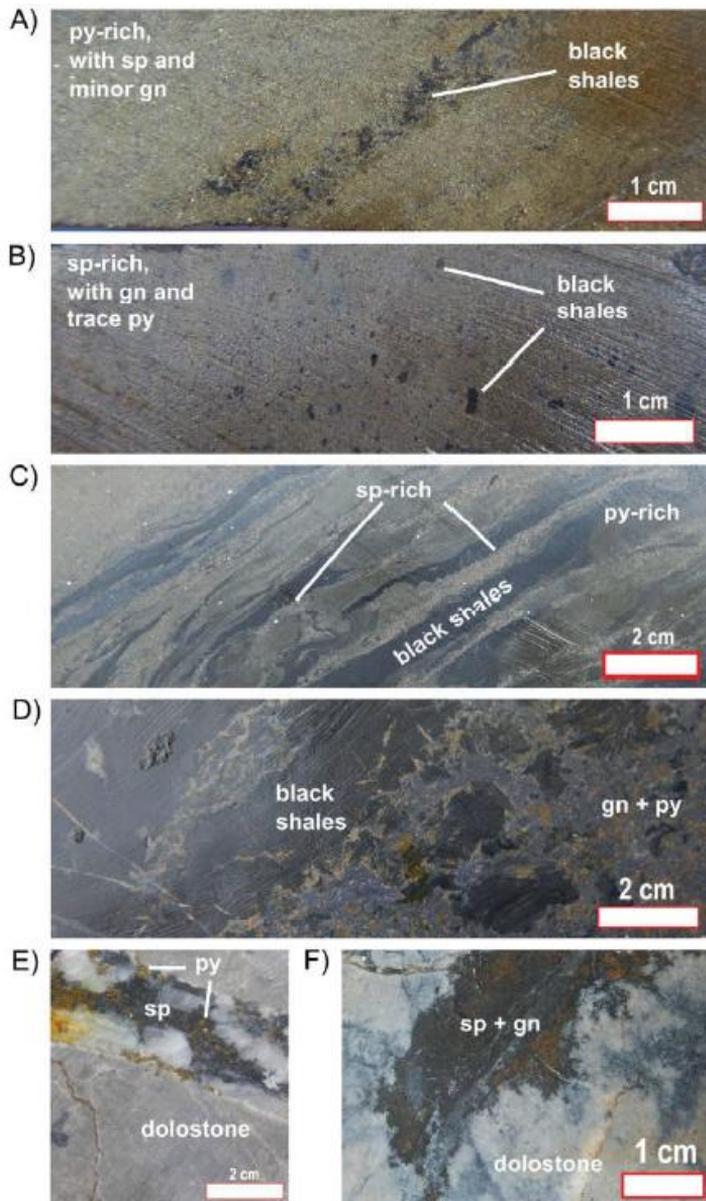
Berdasarkan kelimpahan mineral bijih dan hubungan teksturnya, tubuh bijih yang terdapat pada Unit Julu dibagi menjadi jenis bijih masif kaya *pyrite*, masif kaya *sphalerite*, sulfida berlapis, breksi kaya *galena*, dan bijih urat (Rivai dkk., 2020). Pada unit Jehe, endapan bijih terdiri atas jenis bijih urat dan *disseminated*. Mineral bijih utama adalah *sphalerite* dan *galena*. Besi sulfida didominasi oleh *pyrite* yang berasal dari diagenetik, hidrotermal dan metamorf. Pada satuan Julu, terdapat jejak *tetrahedrite*, *boronite*, dan *chalcopyrite*. Sebaliknya, *tetrahedrite* terjadi dalam jumlah yang signifikan di dalam tubuh yang dihuni oleh satuan Jehe dengan *tennantite*, *arsenopyrite*, *freieslebenite*, *boulangerite*, dan *diaphorite*. Selain itu, mineral *gangue* pada endapan ini terdiri atas *quartz*, *dolomite*, dan minor *hyalophane*. *Barite* dan *calcite* hadir dalam jumlah sedikit secara lokal.



Gambar 32 *Pyrrhotite* dan *metamorphic pyrite* hadir *coexisting* dengan *sphalerite* (sp), *galena* (gn), dan *chalcopyrite* (cp) pada *lower ore horizon* di Lae Jehe (kiri). Sebuah *hand specimen* urat *quartz* (kanan) yang mengandung *sphalerite* (sp) dan *galena* (gn) (Sumber: Rivai dkk., 2020).

Tipe badan bijih pada Sopokomil deposit dibedakan berdasarkan kenampakan dan klasifikasi tekstur, yaitu *pyrite-rich massive*, *sphalerite-rich*

massive, banded sulfide, galena-rich breccia, vein, dan replacement ore-types (Gambar 33).



Gambar 33 Tipe badan bijih pada Sopokomil deposit (Dairi – SEDEX) (A) *pyrite-rich massive*, (B) *sphalerite-rich massive*, (C) *banded sulfide*, (D) *galena-rich breccia*, (E) *vein/urats*, dan *replacement ore-types* (F) (Sumber: Rivai dkk., 2021).

Sumber dan interaksi fluida diinterpretasikan berdasarkan hasil studi inklusi fluida pada mineral sphalerite dengan melakukan pengukuran T_m

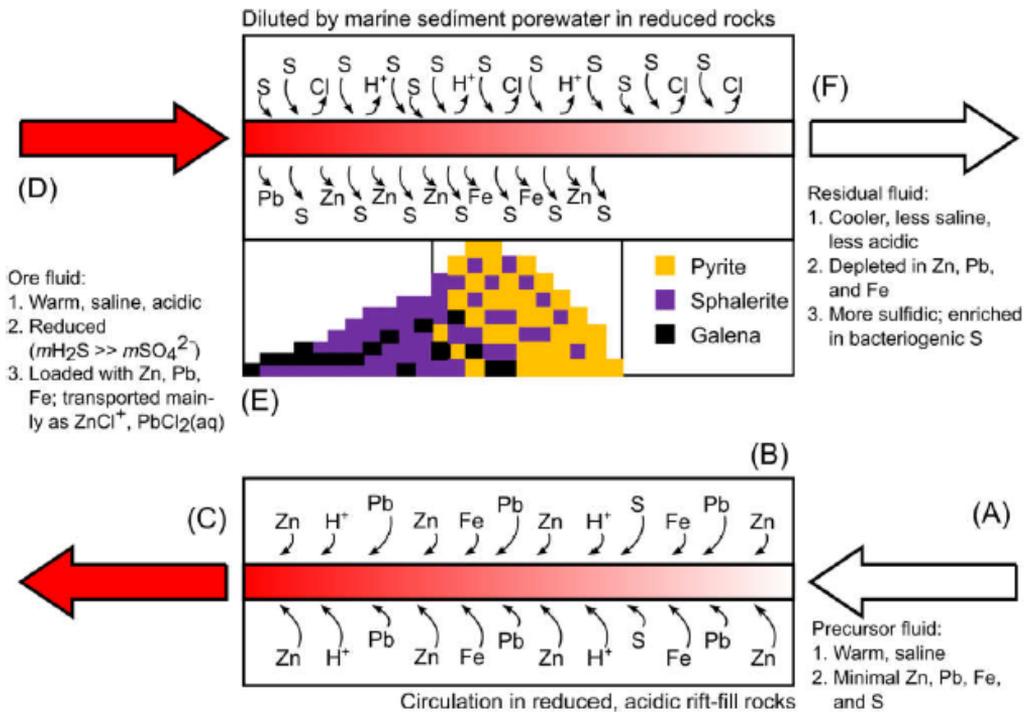
(*melting point*) dan Th (homogenisasi). Pada awalnya, Tm berkisar -3.7 ± 0.4 °C (1σ , n = 26) dan Th sekitar 165.3 ± 5.4 °C (1σ , n = 31). Pada tahap akhir, Tm sekitar -3.7 ± 0.6 °C (1σ , n = 10) dan Th sebesar 164.0 ± 4.4 °C (1σ , n = 13). Tm pada sampel 39-15 dan 39-25 sesuai dengan salinitas sebesar 6.0 ± 0.6 wt.% NaCl (1σ) dan 5.9 ± 0.8 wt.% NaCl.

7.2 Konsep Model Genetik Endapan Zn-Pb Sopokamil

Proses pembentukan deposit Zn-Pb Sopokomil SHMS dibagi menjadi dua tahap: persiapan dan mineralisasi (Gambar 34). Pada tahap pertama, fluida prekursor bersirkulasi dalam paket batuan tereduksi dalam urutan cekungan pengisi celah, menyeimbangkan menjadi tereduksi, kondisi asam dengan suhu dan salinitas sedang (Gambar 34 (A,B)). Fluida dengan daya dukung Zn dan Pb yang cukup berinteraksi dengan batuan reservoir dan melarutkan logam-logam tersebut, menghasilkan fluida bijih yang subur (Gambar 34 B,C).

Setelah naik ke lingkungan bawah permukaan laut, fluida bijih bertemu dengan porewater sedimen laut yang dingin dengan kandungan kimia yang kontras, yang menandai dimulainya tahap kedua, yaitu tahap mineralisasi (Gambar 34(D)). Interaksi keduanya mengganggu keseimbangan termal dan kimiawi dalam fluida bijih, sehingga mendorong terjadinya pengendapan sulfida. Pada awalnya, *galena* dan *sphalerite* merupakan fase sulfida yang dominan.

Dengan pengenceran yang progresif, *pyrite* menjadi dominan dan diendapkan bersama dengan *sphalerite* dan *galena* minor. Endapan sulfida mengkonsumsi S, terutama berasal dari bakteriogenik. Sebagian besar sulfida di Sopokomil terbentuk dalam kisaran suhu yang sempit, ketika hanya sebagian kecil agen pengencer yang terlibat (Gambar 34 (E)). Tahap mineralisasi berakhir ketika cairan residu menjadi tidak jenuh terhadap sulfida (Gambar 34 (F)). Konsep genetik di atas menggarisbawahi pentingnya gradien termal dan kimia yang curam yang dihasilkan oleh pengenceran bijih-cairan terhadap pertumbuhan deposit Zn-Pb Sopokomil SHMS.



Gambar 34 Model genetik konseptual dari deposit Zn-Pb SHMS Sopokomil. (A) Fluida prekursor memasuki zona sumber dalam urutan pengisian celah. (B) Fluida tersebut bersirkulasi di dalam reservoir, mengekstraksi logam, dan menghasilkan (C) Bijih yang tereduksi dan bersifat asam. (D) Saat tiba di lokasi pengendapan, (E) fluida bijih diencerkan oleh *porewater* sedimen laut yang menghasilkan endapan sulfida. (F) Pengenceran yang terus menerus membuat fluida residu menjadi tidak jenuh terhadap sulfida, lebih dingin, lebih sedikit garam, mendekati netral, dan lebih banyak sulfida. (Sumber: Rivai dkk., 2021).

8. MODEL DESKRIPTIF DAN MODEL GENETIK ENDAPAN RARE EARTH ELEMENT DI INDONESIA

Rare Earth Element (REE), yang diterjemahkan menjadi unsur tanah jarang adalah 17 unsur yang menyusun sistem periodik yang jarang ditemukan di alam. Unsur ini tersusun atas Scandium (Sc)-Yttrium (Y) dan 15 unsur lain dari grup lantanida, secara berturut-turut: Lanthanum (La)-Cerium (Ce)-Praseodymium (Pr)-Neodymium (Nd)- Promethium (Pm)-Samarium (Sm)-Europium (Eu)-Gadolinium (Gd)-Terbium (Tb)- Dysprosium (Dy)-Holmium (Ho)-Erbium (Er)- Thulium (Tm)-Ytterbium (Yb)-Lutetium (Lu).

H	Rare Earth Elements																He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
		* La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu															
		** Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr															
		Light Rare Earth Element								Heavy Rare Earth Element							

Gambar 35 Tabel periodik rare earth elements

8.1 Manfaat Unsur Tanah Jarang

Unsur yang terkandung dalam mineral atau batuan harus mengalami proses konsentrasi untuk mencapai kadar yang ekonomis untuk ditambang. Sebagai gambaran, konsentrasi REE di kerak bumi sekitar 147 ppm (Rudnick & Gao, 2003). Maka, REE tidak sejarang namanya jika dibandingkan dengan ketersediaan emas yang hanya berkisar 0,0004 ppm di kerak bumi. Meskipun kelimpahannya di kerak bumi jauh lebih banyak dibandingkan emas maupun logam dasar. Namun, REEs disebut jarang karena di alam unsur-unsur ini

memang jarang ditemukan dalam kadar yang ekonomis karena distribusinya tersebar secara tidak merata dan tidak terdapat pada suatu endapan yang berkadar tinggi seperti halnya aluminium dan nikel.

Meskipun “jarang”, penting untuk diingat bahwa ketersediaan REE di bumi cukup melimpah. Terlebih saat ini REE sudah masuk dalam daftar mineral kritis di Indonesia, sesuai dengan Kepmen ESDM No. 296.K/MB.01/MEM.B/2023. Dalam konteks ekonomi dan industri, kegiatan eksplorasi untuk ketersediaan endapan potensial menjadi suatu hal yang sangat penting saat ini.

Pada dasarnya manfaat dari REE cukup bervariasi, tetapi jika ditarik garis merahnya REE didayagunakan pada industri elektronik sebagai katalis kimia untuk pembuatan baterai alat-alat elektronik portabel. 20 tahun terakhir ini tidak dapat dipungkiri pembuatan dan penggunaan alat elektronik yang sifatnya portabel dan membutuhkan baterai, baik itu berupa telepon seluler, laptop, kamera, dan lainnya. Sehingga, REE yang menjadi salah satu unsur penting dalam pembuatan baterai menjadi bahan baku yang sangat penting. Saat ini baterai yang salah satu unsur penting pembuatnya adalah REE. Selain itu, REE juga bermanfaat di dunia medis, yaitu sebagai salah satu bahan pembuat mesin sinar-x portabel, tabung sinar-x, aplikasi perawatan kanker, dan lainnya. Berikut kegunaan dari masing-masing elemen REE.

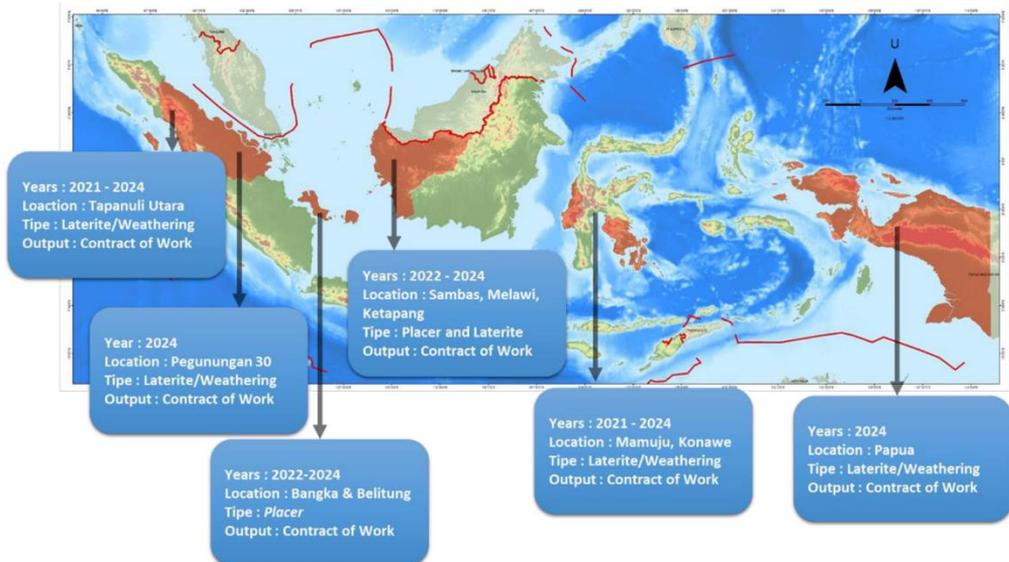
Tabel 2 REE beserta kegunaannya (Goonan, 2011)

Simbol	Nama Unsur	Kegunaan
Sc	Scandium	Komponen pesawat udara, sebagai logam pelacak radioaktif pada pemurnian minyak bumi
Y	Yttrium	Busi, campuran pembuatan baja, filter microwave
La	Lanthanum	Lensa kamera, elektroda baterai
Ce	Cerium	Agen oksida kimia, bubuk pengasah, memberi warna kuning pada keramik dan gelas
Pr	Praseodymium	Magnet permanen, laser, material utama pada pemantik busur karbon
Nd	Neodymium	Magnet permanen, laser, pemberi warna ungu pada gelas dan keramik
Pm	Promethium	Baterai nuklir, cat bercahaya
Sm	Samarium	Magnet permanen, laser, reaktor nuklir
Eu	Europium	Fosfor warna merah dan biru, laser, lampu gas air raksa
Gd	Gadolinium	Tabung sinar x, memori komputer, unsur tambahan pembuatan baja
Tb	Terbium	Laser, stabiliser sel bahan bakar
Dy	Dysprosium	Unsur tambahan magnet neodymium, laser, tempat penyimpanan hard-disk

Simbol	Nama Unsur	Kegunaan
Ho	Holmium	Laser, standar kalibrasi panjang gelombang pada alat spektrometer optik, magnet
Er	Erbium	Laser inframerah, baja vanadium, serat optik
Tm	Thulium	Mesin sinar X, lampu logam halid, laser
Yb	Ytterbium	Stainless steel, alat kedokteran, pemantauan gempa
Lu	Lutetium	Alat kedokteran, gelas berindeks refraksi tinggi

8.2 Keterdapatan REE

Saat ini, REE merupakan material kritis dunia yang dinilai memiliki prospek strategis di masa depan. Proyeksi kebutuhan akan REE di dunia meningkat seiring dengan perkembangan energi hijau/ energi yang lebih ramah lingkungan. Untuk melihat prospektivitas maka perlu melakukan eksplorasi secara regional dan mengevaluasi seberapa banyak area tersebut bisa menjadi endapan mineral. Langkah awal penyelidikan REE yang sudah dilakukan pemerintah Indonesia yaitu menentukan wilayah-wilayah strategis atau potensial yang sebagian besar wilayah yang dipilih merupakan jalur batuan granitik yang berasosiasi dengan ketersediaan REE.



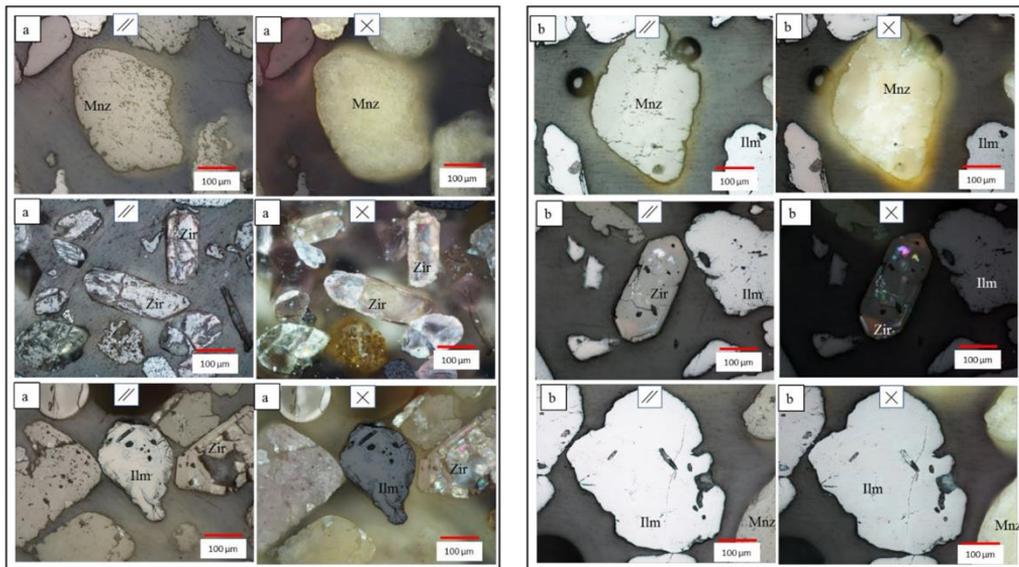
Gambar 36 Target eksplorasi REE di Indonesia (PSDMBP, 2023)

Keberadaan endapan REE dan unsur radioaktif dapat berupa endapan primer sebagai hasil proses magmatik maupun hidrotermal dan banyak dijumpai sebagai endapan sekunder dalam bentuk rombakan sedimentasi (plaser) dan produk pelapukan (lateritik). Penyebaran REE dan unsur

radioaktif di Indonesia banyak ditemukan berasosiasi dengan batuan granit yang terdapat di sepanjang jalur timah (Sumatra bagian barat, Bangka-Belitung), Kalimantan bagian barat, dan Sulawesi bagian barat hingga Papua (Hede dkk., 2019; Syafrizal dkk., 2022).

8.2.1 REE pada Endapan Plaser

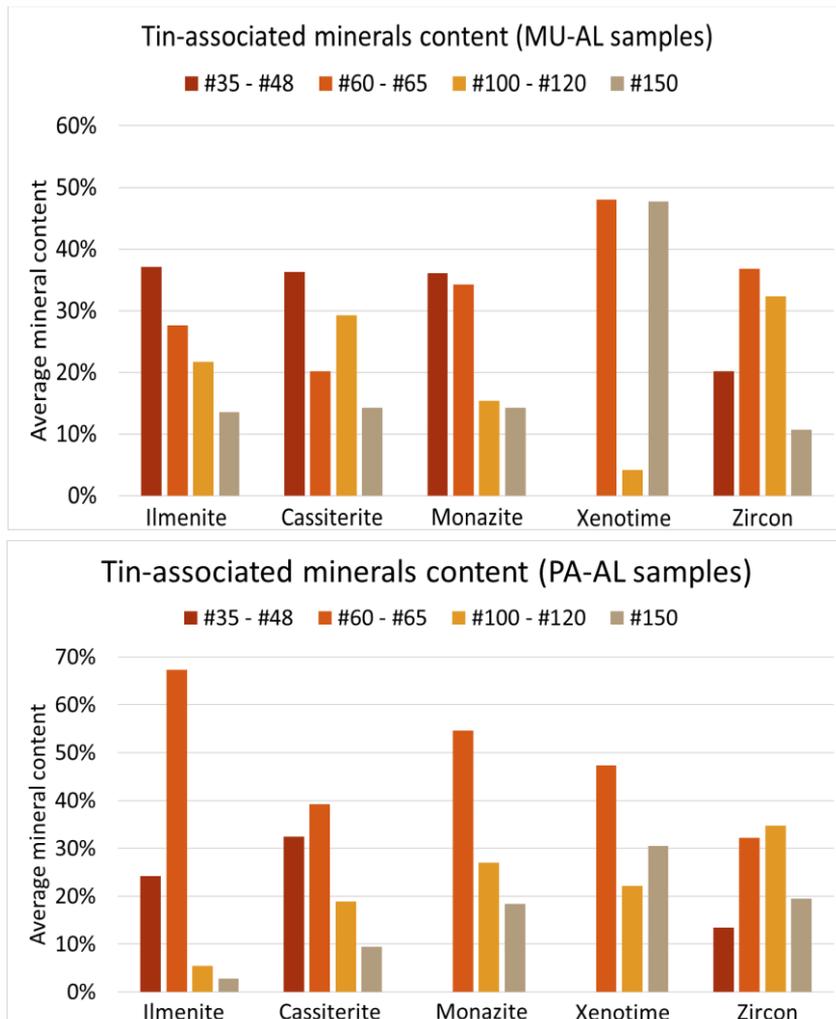
Secara geografi Indonesia termasuk ke dalam *South East Asian Tin Belt* yang memanjang mulai dari Myanmar hingga ke Indonesia. Faktor yang mengontrol terbentuknya endapan timah plaser adalah keberadaan bantuan sumber pembawa timah (granit tipe S), proses pelapukan, erosi, transportasi dan sedimentasi, serta adanya cekungan atau lembah yang menjadi tempat terendapkannya material hasil pelapukan. Endapan sedimenter purba dan modern memiliki sumber unsur tanah jarang yang signifikan.



Gambar 37 Fotomikrograf (a) sampel Bangka Selatan dan (b) sampel Belitung yang memperlihatkan butir mineral Mnz: monazite; Zir: zircon; dan Ilm: ilmenite dalam posisi nikol sejajar (//) dan nikol silang (X) (Syafrizal dkk., 2021).

Daerah Bangka Belitung termasuk dalam sabuk timah yang merupakan intrusi pluton granit. Selain merupakan pembawa logam timah, diketahui bahwa batuan granit juga merupakan batuan beku pembawa mineral-mineral REE seperti monazite dan xenotime. Mineral pembawa REE biasanya terdapat sebagai mineral asosiasi dari komoditi utama endapan timah aluvial. Mineral pembawa unsur tanah jarang seperti monazite dan xenotime yang merupakan

mineral dengan densitas tinggi atau hadir sebagai mineral berat. Produk timah plaser merupakan hasil rombakan dari batuan asal yang berisikan mineral ikutan timah pembawa unsur tanah jarang yang merupakan mineral berat.



Gambar 38 Distribusi fraksi ukuran butir keterdapatn mineral pembawa REE pada sampel timah plaser (Syafrizal dkk., 2022).

Unsur-unsur dari kelompok REE terdapat pada mineral-mineral seperti *monazite*, *zircon*, *xenotime*, *ilmenite*, *rutile*, dan lain-lain, yang merupakan mineral ikutan pada endapan timah dan disebut sebagai Mineral Ikutan Timah (MIT). Pada endapan sekunder yang meliputi endapan eluvial, koluvial, dan aluvial terjadi proses pengkayaan mineral-mineral berat seperti *cassiterite* dan MIT yang mengandung REE. Selain itu pada *tailing/* sisa hasil

pengolahan (SHP), MIT yang mengandung REE juga mengalami pengayaan relatif karena telah terpisah dari mineral *cassiterite*. Kehadiran mineral pembawa REE biasanya tidak lepas dari radioaktif. Unsur yang mengandung nilai radioaktif, sering dijumpai hadir bersamaan dengan mineral pembawa REE. Umumnya sulit untuk memperoleh MIT pada sampel primer, eluvial, koluvial atau batuan dikarenakan MIT hadir dalam bentuk *disseminated* (butiran-butiran yang saling menyebar). Selain itu, MIT pada batuan hadir sebagai mineral aksesoris (Syafrizal dkk., 2019).

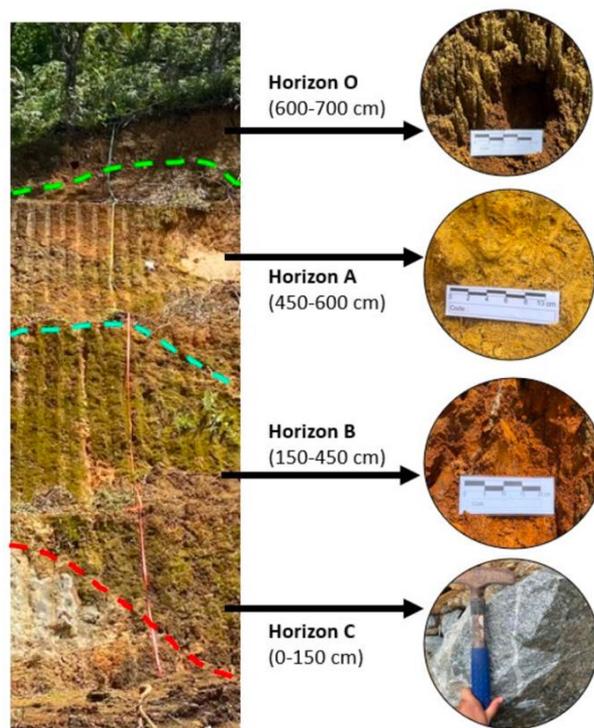
Dari studi yang ada (Syafrizal dkk., 2019), disimpulkan bahwa genesa MIT yang ada di Bangka merupakan tipe letakan (sekunder) sebagai hasil proses rombakan dan sedimentasi. Sketsa dari genesa MIT di mana MIT bersumber dari bukit intrusi formasi Granit yang mengalami rombakan atau erosi tertransportasi oleh gravitasi sehingga hanya berada di sekitar lereng bukit. Fase ini disebut eluvial. Kemudian, MIT mengalir menuruni bukit akibat tertransportasi oleh air namun peran air masih sangat kecil sehingga MIT belum sampai pada badan atau daerah sungai yang kemudian fase ini disebut fase koluvial. Selanjutnya, MIT tertransportasi kembali oleh air hingga sampai pada badan sungai kemudian tertransportasi mengikuti arah aliran sungai (sungai purba) dan terendapkan pada satu waktu dan tempat akibat faktor densitas yang dinamakan fase fluvial (aluvial). MIT yang tidak terendapkan akan tertransportasi sampai pada hilir sungai, yaitu pantai. MIT terbawa sampai melebihi bibir pantai dan kemudian terdorong oleh ombak pantai sehingga terendapkan di bibir pantai. Fase ini dinamakan fase endapan pantai (aluvial) dan menjadi fase terakhir dari genesa MIT.

8.2.2 REE Ion-adsorption

Selama bertahun-tahun, REE secara geokimia dianggap tidak bergerak (*immobile*) selama alterasi dan metamorfisme, karena itu sangat berguna dalam interpretasi geologi. Akan tetapi, beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa kelimpahan REE mengalami perubahan pada proses alterasi dan pelapukan. Saat ini diketahui bahwa REE merupakan unsur *mobile* dan cenderung diperkaya selama pelapukan batuan granit di beberapa daerah subtropik. Secara geokimia, kelimpahan unsur tanah jarang mengalami perubahan selama proses alterasi ataupun pelapukan dan akan membentuk REE tipe *ion adsorption*. Proses alterasi ataupun pelapukan menyebabkan perubahan pola distribusi unsur tanah jarang. Unsur tanah jarang merupakan

unsur *incompatible* yang melimpah jumlahnya pada batuan beku granitik dan dapat berada dalam fraksi geokimia maupun mineral primer residual dalam lapukan granit.

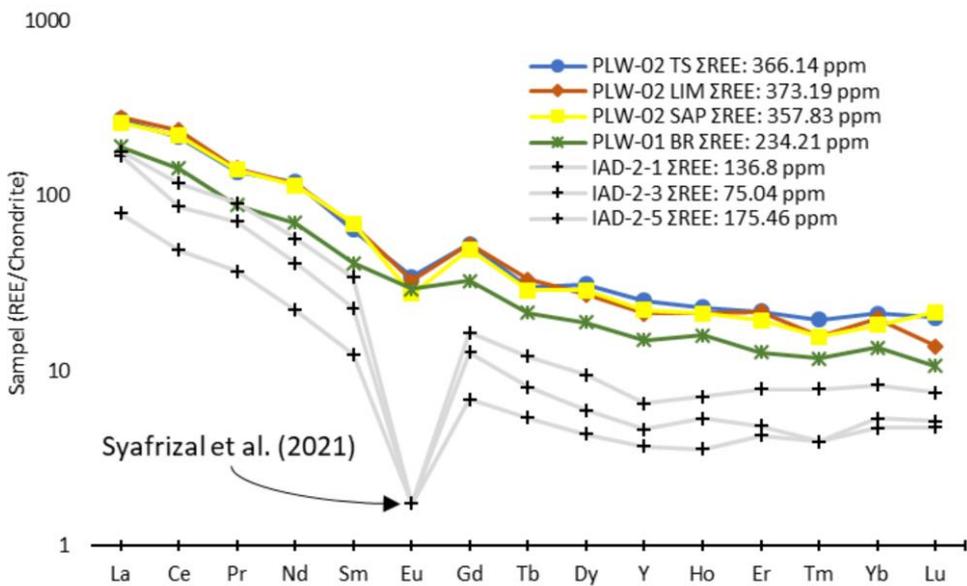
Faktor yang memengaruhi pembentukan endapan REE *ion adsorption* adalah iklim, topografi, komposisi *parent rock* dan waktu pelapukan yang cukup lama pada lingkungan yang stabil. Dari studi sebelumnya menunjukkan bahwa REE yang terlindikan dari profil atas akan terakumulasi pada zona di bawahnya. Mineral pembawa REE terdekomposisi oleh air tanah yang bersifat asam dan ion REE^{3+} akan termobilisasi menuju profil lebih dalam lalu teradsorpsi oleh *kaolinite* dan *halloysite*, atau membentuk mineral REE sekunder. Kontras dengan unsur REE lainnya, dalam kondisi oksidasi di dekat bawah permukaan unsur Ce lebih sulit termobilisasi dan umumnya akan membentuk mineral cerianite atau terbentuk bersamaan Mn-oxides sebagai ion Ce^{4+} .



Gambar 39 Contoh profil pelapukan granitoid di Sulawesi Barat (Syafrizal dkk., 2022)

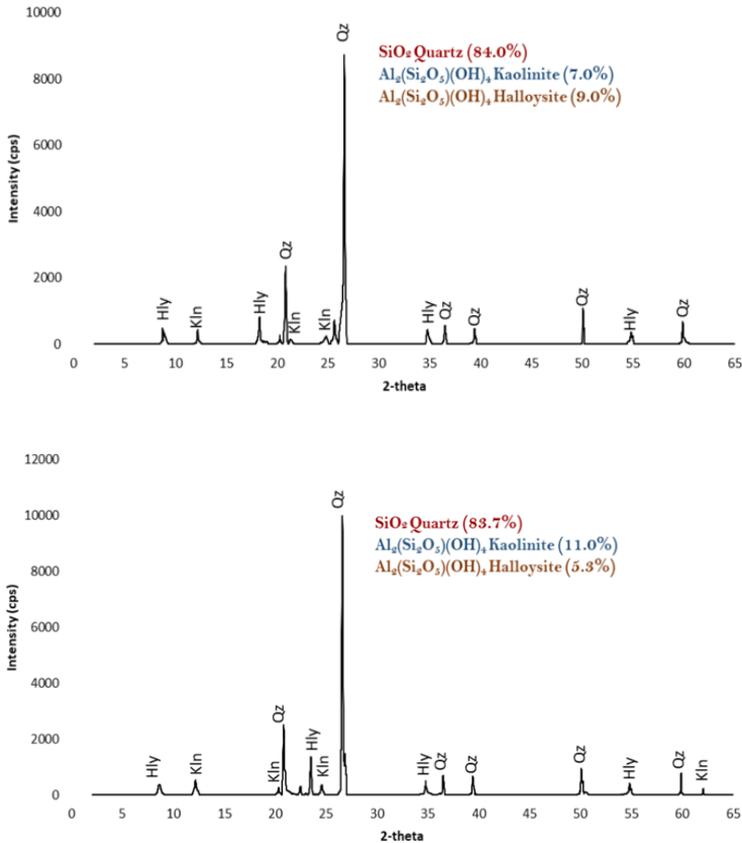
Dari hasil studi yang dilakukan sebelumnya di profil pelapukan granitoid di Bangka dan Sulawesi Barat (Alvionita dkk., 2023; Syafrizal dkk., 2021), ada

perbedaan komponen produk lapukan granitoid antara granitoid yang ada di Bangka dan Sulawesi Barat yang disebabkan oleh jenis granitoidnya yang berbeda. Selain itu, hampir dari semua sampel lapukan hampir selalu muncul (dijumpai) mineral lempung seperti *kaolinite*, *halloysite* dan *monmorillonite*. Jika diamati lebih detail, maka akan dijumpai adanya perbedaan persentasi kandungan mineral tersebut pada tiap horizon. Kandungan REE yang paling tinggi terdapat pada horizon A dan B yang kemungkinan disebabkan oleh konsentrasi atau kandungan *kaolinite* dan *halloysite* yang lebih tinggi dibandingkan dengan horizon yang lainnya.



Gambar 40 Normalisasi REE terhadap *chondrite* pada sampel dari Pulau Bangka dan Sulawesi Barat (Alvionita dkk., 2023; Syafrizal dkk., 2021)

Pada umumnya REE yang terserap oleh mineral lempung lebih dominan kaya akan unsur HREE dibanding unsur LREE, akan tetapi pola pengayaan REE pada tiap horizon penelitian ini apabila diperhatikan akan menunjukkan LREE/ HREE yang tinggi atau jumlah LREE yang lebih banyak dibandingkan HREE. Beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya pengayaan LREE dibandingkan dengan HREE salah satunya disebabkan oleh mineral-mineral yang berhubungan dengan grup mika, dibuktikan dengan ditemukannya biotit pada semua sampel batuan melalui pengamatan petrografi. Selain itu pengayaan LREE dibandingkan HREE juga disebabkan oleh adanya pengaruh unsur Fe-Mn yang memiliki kemampuan substitusi dengan LREE dibandingkan HREE.



Gambar 41 Representasi pola XRD dari profil lapukan granitoid (atas: horizon A, bawah: horizon B). Qz. quartz; Hly. haloisit; Kln. Kaolinite (Alvionita dkk., 2023)

Total konsentrasi LREE dari profil pelapukan di dua lokasi penelitian (Pulau Bangka dan Sulawesi Barat) berkisar ± 300 ppm, sedangkan HREE berkisar 60 ppm. Pengayaan REE terjadi terutama pada horizon A dan B, yang menunjukkan adanya pengayaan REE dari batuan induk. Jumlah mineral lempung dan mineral lainnya yang terdapat pada profil lapukan disebabkan oleh adanya perbedaan *source rock* pada kedua lokasi. Hal tersebut akan memengaruhi proses dekomposisi mineral yang membawa REE dan proses adsorpsi REE pada lempung. Gambar 41 menunjukkan kandungan mineral lempung pada horizon A lebih banyak daripada horizon B, hal ini membuktikan bahwa pengayaan REE horizon A pada kedua profil lapukan mengindikasikan bahwa jumlah Total REE dipengaruhi oleh persentase mineral lempung (Syaftrizal dkk., 2021).

8.3 Implikasi terhadap Eksplorasi

Model genetik endapan REE di Indonesia mencakup berbagai kondisi geologi dan geokimia yang berpengaruh pada pembentukan endapan tersebut. Sebagian besar endapan REE di Indonesia terkait dengan intrusi granitik. Endapan umumnya ditemukan di daerah perbukitan dan terkait dengan granitoid yang memuat mineral REE seperti *monazite* dan *xenotime*. Analisis geokimia, pemetaan struktur geologi, dan penggunaan teknologi eksplorasi modern menjadi kunci dalam mengidentifikasi dan mengonfirmasi potensi endapan REE, yang dapat berdampak positif pada pencarian sumber daya mineral yang strategis bagi industri teknologi tinggi.

Sampel-sampel yang mengandung mineral pembawa REE dapat dijadikan basis data reflektansi spektroskopi yang memperlihatkan karakteristik khas khususnya pada absorpsi pada beberapa panjang gelombang tertentu. Hasil analisis sampel yang berasosiasi dengan endapan timah (Hede dkk., 2019), kurva reflektansi menunjukkan adanya kenampakan absorpsi yang dapat menjadi karakteristik untuk kehadiran REE, khususnya pada rentang panjang gelombang VNIR. Identifikasi mineral pembawa REE ditemukan khususnya pada sampel yang berasal dari material *tailing* timah. Implementasi metode ini dapat meningkatkan efisiensi eksplorasi dan berkontribusi pada pengembangan sumberdaya mineral REE di Indonesia.

9 UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis haturkan kepada:

1. Segenap Keluarga Besar Kelompok Keahlian Eksplorasi Sumber Daya Bumi FTTM ITB sbb.: Prof. Totok Darijanto (Alm.), Prof. Sudarto Notosiswojo, Prof. Komang Anggayana, Ir. Teti Indriati, M.T., Prof. Lilik Eko Widodo, Dr. Budi Sulistijo, Prof. Syafrizal, Dr. Irwan Iskandar, Dr. Agus Haris Widayat, Dr. Arie Naftali Hawu Hede, Dr. Andy Yahya Al Hakim, Dr.Eng. Tomy Alvin Rivai, dan Mirza Dian Rifaldi, S.T., M.T. atas kerja samanya selama ini dalam tugas akademik, pengembangan institusi, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat.
2. Segenap Guru Besar yang telah memberikan rekomendasi untuk pengusulan jabatan Guru Besar sbb.: Prof. Komang Anggayana, Prof. Ridho Kresna Wattimena, Prof. Lambok Hutasoit dari FITB ITB, Prof. Wahyu Srigutomo dari FMIPA ITB, Prof. Mega Fatimah Rosana dari Universitas Padjadjaran, Prof. Koichiro Watanabe dari *Kyushu University* Jepang, dan Prof. Akira Imai dari *Kyushu University* Jepang.
3. Segenap Dekanat FTTM ITB, Prof. Ridho Kresna Wattimena (Dekan) dan Dr. Susanti Alawiyah (Wakil Dekan Sumber Daya); Ketua dan Sekretaris Senat Fakultas Prof. Budi Sulistianto dan Prof. Eddy Agus Basuki beserta para Anggota Senat Fakultas; seluruh Tenaga Kependidikan FTTM ITB, yang telah membantu dan mendukung proses pengusulan Guru Besar maupun pengembangan karir sebagai dosen hingga saat ini.
4. Segenap Guru dan Dosen mulai dari TK, SD, SMP, SMA, Sarjana, Magister, Doktor, serta Program Profesi Insinyur, khususnya para dosen pembimbing tugas akhir sbb.: Pembimbing Skripsi S1 Prof. Totok Darijanto (Alm.) dan Ir. Darmawan Sumardi (Alm.); Pembimbing Tesis S2 Prof. Totok Darijanto (Alm.); Pembimbing Disertasi S3 Prof. Koichiro Watanabe dan Prof. Akira Imai.
5. Segenap Kolaborator penelitian dan publikasi ilmiah dari Luar Negeri sbb.: Prof. Koichiro Watanabe, Prof. Akira Imai, Dr. Yoshinobu Motomura, Dr. Kotaro Yonezu, dan Dr. Thomas Tindell dari *Kyushu University* Jepang; Dr. Kenzo Sanematsu dan Dr. Shota Satori dari *Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* Jepang; Prof. Adrian J. Boyced dari *Scottish Universities*

Environmental Research Centre; Prof. Ryohei Takahashi dari *Akita University* Jepang.

6. Segenap Kolaborator penelitian dan publikasi ilmiah dari Indonesia sbb.: Dr.Eng. Asep Saepuloh dari KK Petrologi, Vulkanologi, dan Geokimia FITB ITB; Bapak Ir. Damar Kusumanto dari PT Citra Palu Minerals.
7. Segenap Alumni khususnya yang telah dibimbing dan lulus pada tahap Sarjana, Magister dan Doktor bimbingan, yang telah bekerja sama, membantu penelitian dan publikasi hasil penelitian, serta Mbak Periska mahasiswa bimbingan Doktor yang saat ini masih berjuang untuk meneruskan dan menyelesaikan penelitiannya.
8. Segenap Keluarga Besar Kelompok Keahlian Teknik Pertambangan dan Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi FTTM, atas perhatian dan kerja samanya selama ini dalam tugas akademik, pengembangan institusi, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat, maupun interaksi keseharian di Gedung Labtek IVa.

Ucapan terima kasih yang sangat khusus penulis sampaikan kepada Keluarga tercinta, yaitu:

1. Ny. Devi Febriani S.Si, istri yang penuh pengertian dan selalu setia mendukung perjuangan dalam suka dan duka hingga saat ini, serta kedua putri tercinta, yaitu Fadhillah Layalia Zahlevi dan Hannia Azzahra Zahlevi yang selalu memberikan doa terbaik untuk kedua orang tuanya.
2. Papa (Alm) dr. Lillah dan Mama Azmiati, yang telah merawat, membesarkan dan mendidik serta selalu mendoakan, serta kakak Syafrial, adik-adik Dasrizal, Zulfakhri, dan Lili Amniati yang selalu mendukung dan mendoakan.
3. Ayah Januar Koto (Alm.) dan Ibu Gusnawati (Almh), kedua mertua yang selalu mendoakan dan mendukung perjuangan dari awal berumah tangga.

DAFTAR PUSTAKA

- [01] Alvionita, A. F., **Syafrizal**, Hakim, A. Y. A. (2023). Mineralogi dan Pengayaan REE Tipe Ion-Adsorption pada Profil Lapukan Granitoid di Sulawesi Barat; Implikasi terhadap Eksplorasi. *Jurnal GEOSAPTA*, 9 (2), pp. 95-104.
- [02] Basuki, A., Sumanagara, D. A., Sinambela, D. (1994). The Gunung-Pongkor gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Jour. Geochem. Explor.*, 50, pp. 371-391.
- [03] Carlile, J. C., Mitchell, A. H. G. (1994). Magmatic arcs and associated gold and copper mineralization in Indonesia. *Jour. Geochem. Explor.*, 50, pp. 91-142.
- [04] Cox, D.P., Singer, D.A. (1986). Mineral deposit models. *U.S. Geological Survey Bulletin 1693*, pp. 379.
- [05] Barber, A.J., Crow, M.J. (2003). An evaluation of plate tectonic models for the development of Sumatra. *Gondwana Research*, 6, pp. 1-28.
- [06] Crow, M.J., van Leeuwen, T.M. (2005). In: Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution. *Geological Society Memoir 31, the Geological Society*, pp. 147-174.
- [07] Dong, G., Morrison, G., Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland—Classification, origin, and implication. *Economic Geology*, 90, pp. 1841-1856.
- [08] Garwin, S., Hall, R., Watanabe, Y. (2005). Tectonic setting, geology, and gold and copper mineralization in Cenozoic magmatic arcs of Southeast Asia and the West Pacific. *Economic Geology*, pp. 891-930.
- [09] Goonan, T.G. (2011). Rare earth elements—End use and recyclability. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5094*.
- [10] Griffie, C., Bailly, L., Milesi, J. P. (2002). Supergene alteration of primary ore assemblages from low-sulfidation Au-Ag epithermal deposit at Pongkor, Indonesia, and Nazareno, Peru. *Economic Geology*, 97, pp. 561-571.
- [11] Heald, P., Foley, N. K., Hayba, D. O. (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology*, 82, pp. 1-26.

- [12] Hede, A. N. H., **Syafrizal**, Steven, G. (2018). Assessment of Granitoid-Related Mineralization using Visible Near-Infrared and Shortwave Infrared Reflectance Spectroscopy. *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2018*, pp. 144-149.
- [13] Hede, A. N. H., Firdaus, M. A., Priyana, Y. L. O., Heriawan, M. N., **Syafrizal**, Syaeful, H., Lubis, I. A. (2019). Spektroskopi Reflektansi Sampel Tanah dan Batuan yang Mengandung Mineral Pembawa Unsur Tanah Jarang dan Radioaktif, *Eksplorium*, 40 (2), pp. 89-98.
- [14] Hedenquist, J. W., Arribas, A. Jr., Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Rev. in Economic Geology*, 13, pp. 245-277.
- [15] Hedenquist, J. W., Henley, R. W. (1985). The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions: Evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition. *Economic Geology*, 80, pp. 1379-1406.
- [16] Hedenquist, J.W., Lowenstern, J.B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, pp. 519-527.
- [17] Henley, R.W. (1985). The geothermal framework of epithermal deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2, pp. 1-24.
- [18] Kohno, Y. (2005). Geological and geochemical study on the Ungaran geothermal field, Central Java, Indonesia. *Graduate Thesis*, Kyushu University, Kyushu, Japan (in Japanese).
- [19] Milesi, J. P., Marcoux, E., Sitorus, T., Simandjuntak, M., Leroy, J., Baily, L. (1999). Pongkor (West Java): A Pliocene supergene-enriched epithermal Au-Ag-(Mn) deposit. *Mineralium Deposita*, 34, pp. 131-149.
- [20] Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi. (2023). *Indonesia REE, Lithium, and Graphite Potency*. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- [21] Rivai, T.A., **Syafrizal**, Yonezu, K., Sanematsu, K., Watanabe, K. (2021). Nature of Ore Fluid at the Sopokomil Zn-Pb Deposit, North Sumatra, Indonesia: Implications for Metal Transport and Sulfide Deposition. *Geosciences*, 11, pp. 298.
- [22] Rivai, T.A., **Syafrizal**, Yonezu, K., Tindell, T., Boyce, A.J., Sanematsu, K., Satori, S., Watanabe, K. (2020). The Dairi SEDEX Zn + Pb + Ag Deposit (North Sumatra, Indonesia): Insights from Mineralogy and Sulfur Isotope Systematics. *Ore Geology Reviews*, 122.
- [23] Rivai, T.A., Yonezu, K., **Syafrizal**, Sanematsu, K., Kusumanto, D., Imai, A., Watanabe, K. (2019). A low-sulfidation epithermal mineralization in

- the River Reef Zone, the Poboya Prospect, Central Sulawesi, Indonesia: Vein textures, ore mineralogy, and fluid inclusions. *Res. Geol.*, pp. 1–17.
- [24] Rosana, M. F., Matsueda, H. (2002). Cikidang hydrothermal gold deposit in Western Java, Indonesia. *Resource Geology*, 52, pp. 341 – 352.
- [25] Rudnick, R.L., Gao, S. (2003). The Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3, pp. 1-64.
- [26] Simmons, S. F., White, N. C., John, D. A. (2005). Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J. and Richards, J. P. (eds). *Economic Geology Publishing Company*, pp. 485–522.
- [27] **Syafrizal**, Amertho, S. D., Azwardi, I., Indriati, T., Nabilla, A. O., Suharjo, E. G. W., Hede, A. N. H. (2019). Karakterisasi Mineral Ikutan Timah Pada Endapan Primer, Sekunder, dan Tailing di Bangka Selatan dan Belitung. *Prosiding TPT XXVIII PERHAPI 2019*, pp. 807-816.
- [28] **Syafrizal**, Hakim, A. Y. A, Rasma, P., Sulastri, A. (2022). Geochemistry of Bangka Granite Related to The Occurrences of REEs Case Study on Alluvial and Laterite Samples. *International Symposium on Earth Science and Technology 2022*, pp. 40-45.
- [29] **Syafrizal**, Hede, A. N. H., Hakim, A. Y. A, Permatasari, M. I. (2021). Identifikasi Keberadaan Rare Earth Elements Tipe Ion-Adsorption Pada Lempung: Sampel dari Muntok dan Lubuk Besar, Pulau Bangka. *Jurnal GEOSAPTA*, 7 (2), pp. 125-132.
- [30] **Syafrizal**, Hede, A. N. H., Hakim, A. Y. A., Sihite, R. F. (2021). Karakterisasi Mineral Ikutan Timah Pembawa REE di Bangka Selatan dan Badau. *Jurnal GEOSAPTA*, 7 (1), pp. 7-13.
- [31] **Syafrizal**, Imai, A., Watanabe, K. (2007). Origin of Ore-forming Fluids Responsible for Gold Mineralization of the Pongkor Au-Ag Deposit, West Java, Indonesia: Evidence from Mineralogic. *Resource Geology*, 57 (2), pp. 136-148.
- [32] **Syafrizal**, Imai, A., Motomura, Y., Watanabe, K. (2005). Characteristics of gold mineralization at the Ciurug Vein, Pongkor Gold-Silver Deposit, West Java, Indonesia. *Resource Geology*, 55, pp. 225 – 238.
- [33] **Syafrizal**, Rasma, P., Hakim, A. Y. A. (2022). Potential REE-Li resources in lateritic granite in Indonesian granitoid formations: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1031 (1).
- [34] **Syafrizal**, Rivai, T. A., Yonezu, K., Kusumanto, D., Watanabe, K., Hede, A. N. H. (2017). Characteristics of a lowsulfidation epithermal deposit in

the river reef zone and the Watuputih Hill, the Poboya gold prospect, Central Sulawesi, Indonesia: Host rocks and hydrothermal alteration. *Minerals*, 7, pp. 124.

- [35] Van Leeuwen, T. M., Pieters, P. E. (2011). Mineral deposits of Sulawesi. *Proceedings of the Sulawesi Mineral Resources 2011 Seminar MGEI-IAGI*. Manado. Masyarakat Geologi Ekonomi, Indonesia, pp. 1–109.
- [36] Warmada, I. W., Lehmann, B., Simandjuntak, M. (2003). Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Canad. Mineral*, 41, pp. 185–200.
- [37] Wilkinson, J. J. (2001). Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, pp. 229–272.

CURRICULUM VITAE



Nama : Syafrizal
Tempat/tgl lahir : Padang, 25 November 1971
Kel. Keahlian : Eksplorasi Sumber Daya Bumi
Alamat Kantor : Jl. Ganesha 10, Bandung
Nama Istri : Devi Febriani
Nama Anak : 1. Fadhilla Layalia Zahlevi
2 Hannia Azzahra Zahlevi

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. SDN 21 Padang, Sumatera Barat (1979 – 1985).
2. SMPN 7 Padang, Sumatera Barat (1985 – 1988).
3. SMAN 2 Padang, Sumatera Barat (1988 – 1991).
4. Sarjana Teknik - Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan, ITB (1991 – 1996)
5. Magister Teknik - Program Magister Rekayasa Pertambangan, ITB (1998 – 2000)
6. Doctor of Engineering - Earth Resources Engineering, Kyushu University, Jepang (2003 – 2006).
7. Insinyur – Program Profesi Insinyur, ITB (2017).

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Tahun 1998 – sekarang : Dosen
2. Tahun 2016 – 2019 : Ketua Center of Research Excellent (CoRE) Eksplorasi dan Pemodelan Sumberdaya Minerba – FTTM ITB
3. 2016 : Sekretaris Ketua Tim Penyusun Renstra FTTM Tahun 2016 – 2021.
4. 2021 : Ketua Tim Penyusun Renstra FTTM Tahun 2021 – 2026.
5. Tahun 2019 – sekarang : Manajer Laboratorium Eksplorasi dan Evaluasi Bahan Galian FTTM
6. Tahun 2011 – 2012 : Koordinator Kemahasiswaan FTTM ITB
7. 2012 – 2013 : Ketua Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan FTTM ITB.

8. 2012 – 2016 : Representatif ITB untuk Program The ASEAN-Japan BUILD-UP Cooperative Education Program (AJ-BCEP) for Global Human Resources Development in Earth Resources Engineering.
9. 2016 – 2020 : Ketua Program Studi Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan FTTM ITB
10. 2020 – sekarang : Wakil Dekan Bidang Akademik, Kerjasama, dan Kemahasiswaan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan (FTTM) ITB.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. CPNS (1 Maret 1998)
2. PNS (1 Januari 2001)
3. Penata Muda Tk. 1 Gol. III.b (1 Oktober 2005)
4. Penata Gol. III.c (1 Oktober 2007)
5. Penata Tk. 1 III.d (1 Oktober 2009)
6. Pembina IV.a (1 Oktober 2011)
7. Pembina Tk.1 IV.b (25 Oktober 2023)

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli (TMT 01 Januari 2001)
2. Lektor (TMT 01 Juni 2005)
3. Lektor Kepala (TMT 01 Juni 2009)
4. Guru Besar (TMT 01 Februari 2023)

V. KEGIATAN PENELITIAN

1. M. Nur Heriawan, **Syafrizal**, Komang Anggayana, Teti Indriati, Optimasi Model Endapan Laterit dengan Metode Geostatistik Multivariabel dan Analisis Tutupan Lahan., Riset KK-ITB., 2009., Sebagai Anggota Peneliti.
2. M. Nur Heriawan, **Syafrizal**, Komang Anggayana, Lilik Eko Widodo, Sudarto Notosiswoyo., Pengembangan Metode Klasifikasi Sumberdaya Batubara dan Optimasi Jarak Pemboran Eksplorasi dengan Pendekatan Geostatistik., Riset KK-ITB., 2010., Sebagai Anggota Peneliti.
3. Komang Anggayana, **Syafrizal**, Teti Indriati, Arie Naftali Hawu Hede, Basuki Rahmad., Studi Siklus Fasies Pengendapan Lapisan Batubara Tebal (Studi Kasus Lapisan Batubara Muara Wahau, Kalimantan Timur)., Riset KK-ITB., 2010., Sebagai Anggota Peneliti.

4. **Syafrizal**, Komang Anggayana, c, Teti Indriati., Aplikasi Studi Mineralogi dan Mikrotermometri Untuk Penentuan Zona dan Horizon Mineralisasi Mineral Berharga Pada Endapan Epithermal., Riset KK-ITB., 2011., Sebagai Penanggungjawab Penelitian.
5. **Syafrizal**, Ginting Jalu Kusuma, Andy Yahya Al Hakim., Penyusunan Buku Panduan Lokasi Wisata Tambang di Wilayah Jawa Barat dan Sekitarnya., Program Pengabdian Masyarakat ITB, LPPM ITB, 2013.
6. **Syafrizal**, Teti Indriati, Agus Haris Widayat., Studi Mineralogi dan Lingkungan Geokimia pada Tambang Emas dan Galena di Ciseuti, Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat., Program Pengabdian Masyarakat ITB, LPPM ITB, 2015.
7. **Syafrizal**, Teti Indriati, Ari Naftali Hawu Hede., Evaluasi lingkungan tambang dan rekomendasi pengelolaan tambang yang berwawasan lingkungan, Program Pengabdian Masyarakat ITB, LPPM ITB, 2016.
8. **Syafrizal**, Teti Indriati, Arie Naftali Hawu Hede., Mineralogi bijih dan mineralogi butiran endapan REE pada aluvial timah di Pulau Bangka., LPPM ITB, 2017.
9. Teti Indriati, **Syafrizal**, Arie Naftali Hawu Hede., Analisis mineralogi dan lingkungan geokimia pada tambang tungsten skala kecil di Pulau Belitung., LPPM ITB, 2017.
10. Teti Indriati, **Syafrizal**, Arie Naftali Hawu Hede., Studi Pendahuluan Sebaran Geokimia REE dalam Tanah, Vegetasi, Sedimen dan Korelasinya dengan Bentang Alam di Lapangan Panasbumi Wayang., Program Penelitian, Pengabdian kepada masyarakat, dan Inovasi., LPPM ITB, 2018.
11. **Syafrizal**, Teti Indriati, Arie Naftali Hawu Hede, M. Nur Heriawan., Pengembangan Metode Unkonvensional untuk Pemetaan Alterasi Hidrotermal Permukaan., Program Penelitian, Pengabdian kepada masyarakat, dan Inovasi., LPPM ITB, 2018.
12. **Syafrizal**, Teti Indriati, Arie Naftali Hawu Hede, M. Nur Heriawan., Karakterisasi dan Konsep Eksplorasi Potensi Rare Earth Element Atau Mineral Ikutan Timah di Wilayah Izin Usaha Penambangan PT Timah di Bangka dan Belitung., Kerjasama Penelitian PT. Timah., 2019-2020.
13. **Syafrizal**., Arie Naftali Hawu Hede., Kajian Potensi Sumberdaya REE-Lithium pada Batuan Granit dan Granit Terlapukkan di Indonesia (Pulau Bangka Belitung, Sulawesi Barat dan Kalimantan Barat)., Penelitian

Dasar Unggulan Perguruan Tinggi, Kemendikbud/ ristekdikti., 2020-2023.

14. **Syafrizal**, Arie Naftali Hawu Hede, Andy Yahya Al Hakim., Karakterisasi Endapan Pasir Kuarsa di Bangka Belitung – Kalimantan Tengah dan Kemungkinan Pemanfaatannya sebagai Bahan Baku Sel Panel Surya., Program Penelitian, Pengabdian kepada masyarakat, dan Inovasi., LPPM ITB, 2022.
15. **Syafrizal**, Arie Naftali Hawu Hede, Andy Yahya Al Hakim, Tomy Alvin Rivai., Inventarisasi Potensi Logam Kritis dan Logam Tanah Jarang di Sulawesi Barat sebagai Data Awal untuk Antisipasi Kebutuhan Bahan Baku Material Energi Alternatif., Program Penelitian, Pengabdian kepada masyarakat, dan Inovasi., LPPM ITB, 2023.

VI. PUBLIKASI

1. **Syafrizal**, Akira Imai., Yoshinobu Motomura., and Koichiro Watanabe., “Characteristics of gold mineralization at the Ciurug Vein, Pongkor Gold-Silver Deposit, West Java, Indonesia”. *Resource Geology Journal*., Volume 55, Number 3, 225–238, 2005. ISSN 1344-1698.
2. **Syafrizal**, Akira Imai., and Koichiro Watanabe, “Origin of Ore-forming Fluids Responsible for Gold Mineralization of the Pongkor Au-Ag Deposit, West Java, Indonesia: Evidences from Mineralogic, Fluid Inclusion Microthermometry and Stable Isotopes of the Ciurug-Cikoret Veins”., *Resource Geology Journal*, Volume 57, No.2, 136–149, 2007.
3. **Syafrizal**, Tomy Alvin Rivai, Kotaro Yonezu, Damar Kusumanto, Koichiro Watanabe and Arie Naftali Hawu Hede., Host Rocks and Hydrothermal Alteration of a Low Sulfidation Epithermal Gold Deposit at the River Reef Zone and the Watuputih Hill, the Poboya Gold Prospect, Central Sulawesi, Indonesia., *Minerals* 2017, 7, 124; doi:10.3390/min7070124.
4. Ghyats Sabrian, P., Saepuloh, A., **Syafrizal**, Naftali Hawu H., A., Identification of Altered Minerals Based on Synthetic Aperture Radar (SAR) for Mineral Exploration in a Tropical Area., *IOP Conference Series ; Earth and Environmental Science* 71/1 no: 012021., 2017.
5. Tomy Alvin Rivai, Kotaro Yonezu, **Syafrizal**, Koichiro Watanabe., Mineralogy and Geochemistry of Host Rocks and Orebodies at the Anjing Hitam Prospect (Dairi, North Sumatra, Indonesia) and Their Environmental Implications., *EVERGREEN Joint Journal of Novel*

Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, Vol. 06, Issue 01, pp.18-28, March 2019.

6. Tomy Alvin Rivai, Kotaro Yonezu, **Syafrizal**, Kenzo Sanematsu, Damar Kusumanto, Akira Imai, And Koichiro Watanabe., A Low-Sulfidation Epithermal Mineralization in the River Reef Zone, the Poboya Prospect, Central Sulawesi, Indonesia: Vein Textures, Ore Mineralogy, and Fluid Inclusions., Resource Geology Vol. 69, No. 4: 385–401., doi: 10.1111/rge.12206, 2019.
7. Tomy Alvin Rivai, **Syafrizal**, Kotaro Yonezu, Thomas Tindell, Adrian J. Boyced, Kenzo Sanematsu, Shota Satori, Koichiro Watanabe., The Dairi SEDEX Zn + Pb + Ag deposit (North Sumatra, Indonesia): Insights from mineralogy and sulfur isotope systematics., Ore Geology Reviews 122, 2020.
8. **Syafrizal**, Bhima, and Tomy Alvin Rivai., Vein textures at the Hill Reef Zone, the Poboya prospect, Central Sulawesi, Indonesia., AIP Conference Proceedings 2245, 070029 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0007050> Published Online: 08 July 2020.
9. Riza Fahmi, **Syafrizal**, and Asep Saepuloh., Identification technique of alteration zones on site Kutacane, South-East Aceh, verified by petrography and XRD analyses., AIP Conference Proceedings 2245, 070029 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0007050> Published Online: 08 July 2020.
10. Rivai, T.A., **Syafrizal**, Yonezu, K., Sanematsu, K., Watanabe, K. :Nature of Ore Fluid at the Sopokomil Zn-Pb Deposit, NorthSumatra, Indonesia: Implications for Metal Transport andSulfide Deposition., Geosciences., 2021-07-19., DOI:10.3390/geosciences11070298.
11. Muhammad Alfiza Farhan; Yuichi Sugai; Nuhindro Priagung Widodo; **Syafrizal**: The Development of a Low-Cost Method for Monitoring Methane Leakage from the Subsurface of Natural Gas Fields., Methane 2021-12-16 | Journal article DOI: 10.3390/methane1010003.
12. **Syafrizal**., Hede, A.N.H., Magrfirah, N; Development of unconventional method for mapping the surface hydrothermal alteration in wayang windu geothermal field.,, AIP Conference Proceedings, 2021, 2363, 040012.
13. Sari Melati; Ridho Kresna Wattimena; David Prambudi Sahara; **Syafrizal**; Ganda Marihot Simangunsong; Wahyu Hidayat; Erwin Riyanto; Raden Roro Shinta Felisia: Block Caving Mining Method:

Transformation and Its Potency in Indonesia., *Energies* 2022-12-20 | Journal article; DOI: 10.3390/en16010009.

14. Hartiningsih, E., **Syafrizal.**, Sucipta, I.E., Notosiswoyo, S.: Multistage Gold Mineralization at The Wanagon Gold Prospect, Ertsberg District, Mimika Regency, Papua Province, Indonesia; *Indonesian Journal on Geoscience*, 2022, 9(3), pp. 279–290.

Lebih dari 13 di Jurnal Nasional dan Lebih dari 60 artikel di Proseding Seminar Internasional dan Nasional

VII. PENGHARGAAN

1. Piagam Penghargaan Pengabdian 10 tahun (Satya Lencana Karya Satya).
2. Piagam Penghargaan Pengabdian 20 tahun (Satya Lencana Karya Satya).
3. Piagam Penghargaan Institut Teknologi Bandung - Bidang Pengajaran - 2021.
4. Piagam Penghargaan PRIMA ITB 2022 - Pelaksana Pengabdian Masyarakat Terbaik - 2022.

VIII. SERTIFIKASI

1. Competen Person Indonesia (CPI) - Komite Cadangan Mineral Indonesia - Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia (KCMi - PERHAPI) untuk Pelaporan Estimasi Sumberdaya Batubara - 2018 (seumur hidup dengan pelaporan portofolio setiap tahun).
2. Sertifikat Kompetensi - Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP) Dengan Kualifikasi Ahli Pelaporan Hasil Kegiatan Eksplorasi Terperinci Batubara - 2023 (selama 4 tahun).
3. Sertifikat Kompetensi - Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP) Dengan Kualifikasi Ahli Pemodelan dan Estimasi Sumber Daya Batubara - 2023 (selama 4 tahun).
4. Sertifikat Kompetensi Insinyur Profesional - Insinyur Profesional Madya (IPM) - 2023 (selama 5 tahun).
5. Sertifikat Kompetensi - Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP) Kompeten pada Bidang Uji Kompetensi - 2023 (selama 3 tahun).
6. Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi - Asesor Beban Kerja Dosen - 2022.
7. LAMTek - Asesor LAMTek - 2022 (selama 3 tahun).
8. BANPT - Asesor BANPT - 2019 (selama 5 tahun).

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id  [FgbItb](#)  [FGB_ITB](#)
 [@fgbitb_1920](#)  [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-386-2

