

Getme

PEP BANDUNG

Majalah Geologi, Tambang, dan Metalurgi

Cardia Maharani Yohana Siburian:
Meraih Peluang Mengukir Prestasi

**MENGEPAKKAN SAYAP
DARI PEP BANDUNG**

Wisuda ke-5 Mengantar 127 Lulusan
Menuju Dunia Energi dan Pertambangan



Ilmu, Prestasi, dan Langkah Baru

Pembaca GETME yang kami banggakan, Setiap edisi GETME selalu membawa cerita. Ada cerita tentang ilmu pengetahuan, perjalanan akademik, kegiatan kampus, pengalaman mahasiswa, hingga sosok-sosok yang tumbuh dan berkembang bersama Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung.

Seluruh artikel yang dimuat merupakan karya Mahasiswa Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung. Ini bukan sekadar kumpulan tulisan, melainkan cerminan dari semangat intelektual, ketekunan belajar, serta keberanian mahasiswa dalam menuangkan gagasan ilmiah ke dalam bentuk tulisan populer yang komunikatif dan inspiratif.

Pada **GETME Volume V Nomor 2, September 2026**, cerita-cerita tersebut kembali kami hadirkan. Kali ini dengan warna yang terasa istimewa. Di satu sisi, sejumlah artikel ilmiah populer mengajak kita menjelajahi berbagai persoalan kebumihan, energi, pertambangan, lingkungan, dan kesehatan. Di sisi lain, kita menyaksikan sebuah generasi menyelesaikan perjalanan akademiknya dan bersiap memasuki dunia yang sesungguhnya.

Melalui rubrik ilmiah populer, para penulis mencoba membawa ilmu keluar dari ruang kuliah dan laboratorium agar dapat dinikmati oleh pembaca yang lebih luas. Kita diajak memahami merkuri dan belajar dari tragedi Minamata, mengenali timbal sebagai racun yang dapat terakumulasi secara perlahan, melihat dua sisi mineral monasit sebagai sumber unsur tanah jarang sekaligus material yang memiliki risiko radioaktif, hingga memahami hubungan geokimia, lingkungan, dan kesehatan manusia.

Tema-tema tersebut menunjukkan betapa luasnya ilmu kebumihan. Bumi tidak hanya menyediakan sumber daya untuk dimanfaatkan manusia. Di dalamnya terdapat proses, peluang, sekaligus risiko yang perlu dipahami. Karena itu, pengetahuan menjadi penting agar sumber daya alam dapat dimanfaatkan secara bertanggung jawab dan tetap memperhatikan keselamatan manusia serta kelestarian lingkungan.

Semangat keilmuan itu menemukan makna yang semakin kuat ketika pada **12 Agustus 2026**, PEP Bandung menyelenggarakan **Wisuda Ke-5**. Sebanyak **127 wisudawan** dari Program Studi Teknologi Geologi, Teknologi Pertambangan, dan Teknologi Metalurgi menyelesaikan satu tahapan penting dalam perjalanan mereka.

Wisuda tentu bukan sekadar pemindahan tali kucir toga atau penyerahan ijazah. Di baliknya terdapat perjalanan panjang: ruang kuliah, laboratorium, praktikum, kegiatan lapangan, penelitian, organisasi, magang, tugas akhir, serta berbagai pengalaman yang membentuk seorang mahasiswa menjadi lulusan pendidikan vokasi yang siap menghadapi dunia kerja.

Karena itu, kami memilih ungkapan **“Mengepakkan Sayap dari PEP Bandung”** untuk menggambarkan momentum tersebut. Seperti Tari Kukupu yang dipersembahkan dalam rangkaian wisuda, para lulusan telah melalui sebuah proses metamorfosis. Kini saatnya mereka membawa ilmu, pengalaman, kompetensi, dan integritas menuju dunia profesional.

Di antara mereka, ada satu sosok yang kami hadirkan secara khusus dalam edisi ini: **Cardia Maharani Yohana Siburian**, Wisudawan Terbaik PEP Bandung Tahun 2026.

Cardia menyelesaikan pendidikan Diploma Tiga Teknologi Metalurgi dengan **IPK 3,94**. Namun, sebagaimana tergambar dalam profil yang kami sajikan, prestasi Cardia tidak cukup diceritakan hanya melalui angka. Ada proses panjang di belakangnya menulis dan belajar, menjadi asisten laboratorium, melakukan penelitian, berorganisasi, mengikuti kunjungan industri, hingga memperoleh pengalaman

magang di industri metalurgi.

Perjalanan Cardia memberikan pesan sederhana tetapi penting: **peluang perlu diraih, proses perlu dijalani, dan prestasi akan menemukan jalannya.**

Pesan itu sesungguhnya tidak hanya ditujukan kepada mahasiswa. Ia juga relevan bagi kita semua. Kampus adalah tempat ilmu dipelajari, tetapi kehidupanlah yang kelak menguji bagaimana ilmu itu digunakan. Prestasi menjadi membanggakan bukan hanya ketika menghasilkan nilai tinggi atau penghargaan, tetapi ketika pengetahuan dan pengalaman dapat diterjemahkan menjadi karya dan memberikan manfaat kepada orang lain.

Cardia sendiri mengingatkan adik-adik tingkatnya agar memanfaatkan sebanyak mungkin kegiatan positif selama menjadi mahasiswa dan tidak mudah menyerah ketika menghadapi kesulitan dalam perkuliahan.

Inilah pula semangat yang ingin terus dibawa GETME. Kami berharap majalah ini tidak hanya menjadi tempat mendokumentasikan kegiatan kampus, tetapi juga menjadi ruang belajar, ruang menulis, ruang berbagi pengetahuan, dan ruang bagi mahasiswa untuk berani menyampaikan gagasan.

Kami percaya bahwa **kampus yang hidup adalah kampus yang ilmu dan gagasannya terus bergerak** dari ruang kelas menuju laboratorium, dari laboratorium menuju lapangan dan industri, dari penelitian menuju tulisan, dan pada akhirnya dari kampus menuju masyarakat.

Kepada **127 lulusan Wisuda Ke-5 PEP Bandung**, selamat atas keberhasilan yang telah diraih. Toga telah dikenakan dan ijazah telah diterima, tetapi perjalanan baru saja dimulai. Bawalah nama baik almamater, teruskan belajar, jaga integritas, dan berikan karya terbaik di mana pun berada.

Dan kepada para mahasiswa yang masih menjalani perjalanan di PEP Bandung, teruskan mencari kesempatan. Belajarlah, menulislah, menelitalah, berorganisasilah, dan jangan takut mencoba sesuatu yang baru. Siapa tahu, dari langkah-langkah sederhana yang dilakukan hari ini, lahir prestasi besar pada masa yang akan datang.

Akhirnya, selamat menikmati **GETME Volume V Nomor 2, September 2026**. Semoga setiap halaman tidak hanya memberikan informasi, tetapi juga menambah pengetahuan, membangkitkan rasa ingin tahu, dan menginspirasi kita untuk terus belajar dan berkarya.

Selamat membaca dan terus berkarya.

Priatna
Pemimpin Redaksi GETME

ISSN: 2830-599X
VOLUME V NO 2 - SEP 2026

PEP BANDUNG
Getme
Majalah Geologi, Tambang, dan Metalurgi

PENGARAH

Direktur PEP Bandung

PENANGGUNG JAWAB

Wakil Direktur III Bidang
Kemahasiswaan dan Alumni

PEMIMPIN REDAKSI

Priatna

WAKIL PEMIMPIN REDAKSI

Oksil Venriza

KETUA DEWAN REDAKSI

Adang Saputra.

**DEWAN REDAKSI
EDITOR**

Sabtanto Joko Suprpto
Rudiyanisah
Dian Eka Aryanti
Rahadian Nopriantoko

**SEKRETARIAT
REDAKTUR PELAKSANA**

Melly Kusuma Wardani
Andini
Fauziyah Hani
Dea Pratami
Apriyanti

ALAMAT REDAKSI

Politeknik Energi
dan Pertambangan Bandung
Jl. Jend. Sudirman No. 623
Bandung 40211,
Telp: 0822-1999-5001,
Email:
getme.pepbandung@gmail.com
Website: <https://pepbandung.ac.id>

Info Kampus



4 MENGEPAKKAN SAYAP DARI PEP BANDUNG

Wisuda ke-5 Mengantar 127 Lulusan Menuju Dunia Energi dan Pertambangan



Cardia Wisudawan terbaik pepb
Foto: Priatna

Profil



11 **Cardia Maharani Yohana Siburian:** Meraih Peluang Mengukir Prestasi

Getme Populer

18 Toksisitas Merkuri pada Kesehatan Manusia Tragedi Minamata Sebagai Pelajaran

23 Timbal (Pb): Racun Diam-diam yang Persisten



28 Mineral Monasit Dalam Dua Sisi Bahaya Radioaktif atau Sumber Daya Strategis?

Getme Populer

34 Swabakar Batubara dan Kebakaran Alami Tanpa Api Penyulut

41 Dampak Pembakaran Batubara Terhadap Lingkungan Skala Industri Hingga Domestik



46 Dampak dari Air Asam Tambang

51 Aplikasi Geokimia pada Geologi Medis



60 Mekanisme Intrusi Air Laut dan Aspek Geologi

66 Aplikasi Analytical Spectral Devices (ASD): Identifikasi Mineral Alterasi



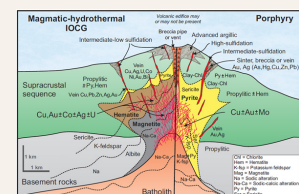
74 Unsur Penunjuk (pathfinder elements) Indikator Mineralisasi Emas

79 Sidik Jari Mineral Melalui XRD: Memecahkan Kompleksitas Alterasi Hidrotermal

84 Nikel Sulfida: Hasil Aktivitas Magmatik Mafik-Ultramafik

92 Nikel Sulfida: Hasil Alterasi Serpentinisasi

98 Peran Non-Condensable Gas (NCG) Pada Pembentukan Endapan Tipe Epitermal dan Porfiri



106 Akhir Evolusi Magma Silikat Berpisah dengan Logam



MENGEPAKKAN SAYAP DARI PEP BANDUNG

Wisuda ke-5 Mengantar 127 Lulusan Menuju Dunia Energi dan Pertambangan

Oleh: Melly Kusuma Wardani

Suasana khidmat berpadu dengan semarak budaya mewarnai Kampus Politeknik Energi dan Pertambangan (PEP) Bandung, Rabu, 12 Agustus 2026. Sejak pagi, para wisudawan berbaris rapi menuju Gedung SM Sair, tempat Wisuda Ke-5 PEP Bandung diselenggarakan. Hari itu menjadi penanda berakhirnya perjalanan mereka sebagai mahasiswa sekaligus awal langkah baru menuju dunia profesional.



A lunan angklung yang dibawakan Komunitas Angklung Taman menyambut langkah para wisudawan. Nada-nada bambu yang mengalun harmonis memberikan warna tersendiri pada prosesi wisuda. Tradisi akademik, budaya lokal, dan harapan akan masa depan seakan bertemu dalam satu perayaan.



Ada yang berbeda pada wisuda tahun ini. Untuk pertama kalinya dalam sejarah wisuda PEP Bandung, kedatangan para wisudawan disambut dan diiringi Tari Upacara Adat yang dipersembahkan Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Tari PEP Bandung.

Setelah para wisudawan menempati tempat duduk masing-masing, suasana berubah semakin khidmat. Barisan Senat PEP Bandung memasuki ruangan diiringi Paduan Suara PEP Bandung yang membawakan *Gaudeamus Igitur*.

Para tamu undangan berdiri memberikan penghormatan ketika barisan senat berjalan menuju panggung kehormatan. Lagu klasik akademik tersebut menghadirkan suasana megah sekaligus menjadi simbol tradisi, semangat intelektual, dan kebersamaan dalam pendidikan tinggi.

Nuansa budaya kembali hadir melalui persembahan Tari Kukupu. Tarian itu seolah menjadi metafora perjalanan para wisudawan. Seperti kupu-kupu yang mengalami metamorfosis sebelum terbang, mereka telah menjalani proses pembelajaran dan pembentukan diri selama berada di kampus. Kini tiba saatnya **mengepakkan sayap**, membawa ilmu dan pengalaman menuju dunia profesional.



127 Lulusan Siap Melangkah

Wisuda bukan sekadar seremoni kelulusan. Bagi PEP Bandung, wisuda juga menjadi momentum penting dalam menyiapkan sumber daya manusia bagi sektor energi dan sumber daya mineral.

■ infokampus

Wisuda Ke-5 PEP Bandung dihadiri Inspektur Jenderal Kementerian ESDM, Yudhiawan; Kepala BPSDM ESDM, Prahoro Yulianto Nurtjahyo; para pejabat di lingkungan Kementerian ESDM; serta pimpinan dan perwakilan perusahaan pertambangan dan energi yang selama ini menjadi mitra PEP Bandung.

Sebanyak **127 wisudawan** mengikuti prosesi wisuda, terdiri atas **44 lulusan Program Studi Teknologi Geologi**, **41 lulusan Program Studi Teknologi Pertambangan**, dan **42 lulusan Program Studi Teknologi Metalurgi**.



Direktur PEP Bandung, Imelda Hutabarat, menyerahkan ijazah secara langsung kepada para lulusan. Prosesi pemindahan tali kucir toga dilakukan oleh Inspektur Jenderal Kementerian ESDM, dilanjutkan ucapan selamat dari Kepala BPSDM ESDM. Satu demi satu lulusan maju dengan membawa kebanggaan, sekaligus harapan untuk segera memberikan kontribusi nyata bagi sektor energi dan pertambangan Indonesia.

Cardia, Wisudawan Terbaik PEP Bandung

Di antara 127 lulusan tersebut, **Cardia Maharani Yohana Siburian** memperoleh penghargaan sebagai wisudawan terbaik PEP Bandung tahun 2026 sekaligus lulusan terbaik Program Studi Teknologi Metalurgi. Cardia berhasil menyelesaikan pendidikannya dengan **IPK 3,94**.

Mewakili para wisudawan, Cardia menyampaikan pesan yang menyentuh tentang persahabatan dan perjalanan yang telah mereka lalui bersama. Ia mengingatkan bahwa setelah wisuda, setiap lulusan mungkin akan menempuh jalan yang berbeda. Namun, kenangan dan persahabatan yang dibangun selama berada di PEP Bandung akan tetap menjadi bagian dari perjalanan hidup mereka.



“Wisuda bukan akhir dari perjalanan kita, tetapi awal dari langkah yang lebih jauh,” demikian salah satu pesan yang disampaikan Cardia kepada rekan-rekannya.

Selain Cardia, penghargaan lulusan terbaik program studi diberikan kepada **Muhammad**



Cardia Wisudawan terbaik pepb.

Rafli Baasituta dari Program Studi Teknologi Geologi dan **Pratama Resky** dari Program Studi Teknologi Pertambangan. Ketiganya menerima selempang penghargaan dari Inspektur Jenderal Kementerian ESDM, piagam penghargaan dari Kepala BPSDM ESDM, serta bunga dari Direktur PEP Bandung.



Muhammad Rafli Baasituta



Pratama Resky

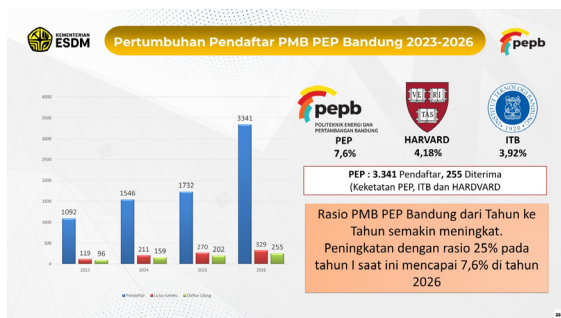
Dari Kampus Menuju Dunia Kerja

Dalam laporannya, Direktur PEP Bandung Imelda Hutabarat menyampaikan perkembangan positif para lulusan. Dari seluruh wisudawan tahun 2026, **26,7 persen telah diterima bekerja sebelum pelaksanaan wisuda**, sedangkan **13,3 persen melanjutkan pendidikan**. Dengan demikian, **41 persen lulusan telah bekerja atau melanjutkan studi**.



Direktur PEP Bandung
Imelda Eva Roturena Hutabarat

Kepercayaan masyarakat terhadap PEP Bandung juga terus tumbuh. Direktur menyampaikan bahwa pendaftaran mahasiswa baru tahun 2026 mempunyai rasio keketatan di angka 7,6 persen dimana pada tahun pertama rasio keketatan mahasiswa hanya di angka 25% atau 1: 4 dimana setiap 4 pendaftar akan lolos 1. Dengan angka 7,6% yang berarti setiap 14 pendaftar baru akan lolos 1 mahasiswa (1 : 14). Saat ini keketatan masuk ITB adalah di 1: 26 dan rasio keketatan masuk Harvard adalah 1: 24. Capaian itu tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak, mulai dari perusahaan, industri, hingga pemerintah daerah.



Inspektur Jenderal Kementerian ESDM Yudhiawan



Pendidikan Vokasi untuk Hilirisasi dan Ketahanan Energi

Dalam kesempatan yang sama, Inspektur Jenderal Kementerian ESDM, Yudhiawan, menegaskan pentingnya investasi pendidikan sebagai fondasi strategis pembangunan sumber daya manusia.

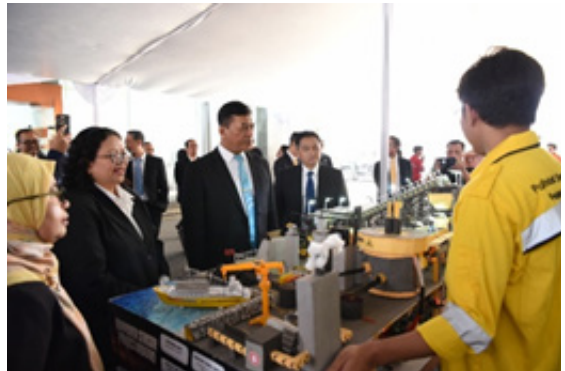
Pendidikan vokasi memiliki posisi penting dalam mendukung hilirisasi mineral kritis, seperti nikel dan tanah jarang, sekaligus memperkuat ketahanan energi nasional.

Dalam konteks tersebut, keberadaan PEP Bandung menjadi penting untuk menjembatani kebutuhan pendidikan dengan industri pertambangan yang membutuhkan tenaga kerja dengan keterampilan khusus.

Pesan tersebut sekaligus mempertegas tantangan yang akan dihadapi para wisudawan. Ijazah yang mereka terima bukan sekadar tanda berakhirnya masa kuliah, melainkan bekal untuk memasuki sektor energi dan pertambangan yang terus berkembang.

Karya Mahasiswa hingga Lagu “Guruku”

Wisuda Ke-5 PEP Bandung tidak hanya berlangsung khidmat, tetapi juga menghadirkan suasana interaktif. Masing-masing program studi membuka *booth* yang menampilkan berbagai peralatan, inovasi, dan hasil karya. Inspektur Jenderal Kementerian ESDM, Kepala BPSDM ESDM, serta para tamu undangan berkesempatan mengunjungi *booth*



Muhammad Fahreza dan Nabiila Fauziah Hardian mempersembahkan lagu Guruku



dan berdialog langsung dengan mahasiswa.

Salah satu bagian yang memberikan sentuhan emosional hadir menjelang akhir acara. **Nabiila Fauziyah Hardian dan Muhammad Fahreza**, mewakili para wisudawan, menyanyikan lagu **"Guruku"**, karya Priatna, dosen PEP Bandung. Lagu tersebut menjadi ungkapan terima kasih para wisudawan kepada para dosen yang telah mendampingi perjalanan mereka selama menempuh pendidikan.

Di tengah kegembiraan wisuda, lagu itu seperti mengingatkan bahwa keberhasilan seorang lulusan tidak lahir dari perjalanan seorang diri. Ada dosen, tenaga kependidikan, orang tua, sahabat, serta banyak pihak yang ikut menemani perjalanan hingga mereka mengenakan toga pada hari itu.

Mengepakkan Sayap

Berakhirnya sidang senat terbuka ternyata bukan akhir dari kemeriahan. Di luar gedung, tradisi arak-arakan telah menunggu para wisudawan. Wisudawan dari Program Studi Teknologi Geologi, Teknologi Pertambangan, dan Teknologi Metalurgi diarak mengelilingi

kawasan kampus. Yel-yel khas program studi, nyanyian kebanggaan himpunan, serta berbagai atribut kreatif mahasiswa membuat suasana semakin meriah. Arak-arakan menjadi ungkapan kegembiraan sekaligus simbol kuatnya rasa kekeluargaan antargenerasi mahasiswa PEP Bandung.

Hari itu, 127 wisudawan meninggalkan satu fase penting dalam perjalanan hidup mereka. Toga akan dilepas, ruang kuliah akan menjadi kenangan, dan kebersamaan di kampus perlahan berubah menjadi cerita. Namun, perjalanan sesungguhnya justru baru dimulai.

Seperti Tari Kukupu yang mengawali prosesi, mereka telah melewati proses panjang untuk bertumbuh dan berubah. Dari PEP Bandung, kini saatnya mereka **mengepakkan sayap** membawa ilmu, kompetensi, integritas, dan semangat untuk berkarya.

Selamat kepada 127 lulusan Wisuda Ke-5 PEP Bandung. Dari kampus energi dan pertambangan, terbanglah menuju masa depan dan berikan karya terbaik untuk negeri.

Penulis: Pustakawan



Cardia Maharani Yohana Siburian bersama Direktur PEP Bandung Imelda Eva Roturena Hutabarat

Cardia Maharani Yohana Siburian Meraih Peluang Mengukir Prestasi

Oleh: Priatna

Ada suasana berbeda ketika Cardia Maharani Yohana Siburian melangkah menuju podium pada hari wisuda Politeknik Energi dan Pertambangan (PEP) Bandung, 12 Agustus 2026. Hari itu ia tidak hanya hadir sebagai seorang wisudawan. Cardia mendapat kehormatan untuk berdiri di hadapan seluruh hadirin, mewakili teman-temannya menyampaikan kesan dan pesan wisudawan.

Profil

Dengan toga yang dikenakannya, Cardia berdiri di podium membawa cerita tentang sebuah perjalanan. Di hadapannya duduk teman-teman yang selama tiga tahun pernah bersama-sama menghadapi kuliah, praktikum, tugas, ujian, kegiatan kampus, hingga perjuangan menyelesaikan pendidikan. Di ruangan yang sama hadir pula para orang tua dan keluarga yang selama ini menyertai perjalanan mereka, serta para dosen dan tenaga kependidikan PEP Bandung yang telah membimbing hingga mereka tiba di hari yang membahagiakan itu.

Cardia menyampaikan pesannya dengan menarik dan penuh rasa syukur. Suasana wisuda yang resmi seakan menjadi lebih dekat dan hangat. Apa yang disampaikan bukan hanya mewakili dirinya sendiri, tetapi juga kegembiraan dan rasa terima kasih teman-temannya yang pada hari itu sama-sama menutup satu perjalanan dan bersiap membuka perjalanan baru.

Kepada orang tua dan keluarga, tersimpan rasa terima kasih atas doa, pengorbanan, kesabaran, dan dukungan yang tidak pernah berhenti. Di balik seorang anak yang hari itu mengenakan toga, ada ayah dan ibu yang telah menemani perjalanan panjang hingga akhirnya dapat menyaksikan putra-putri mereka menyelesaikan pendidikan.

Cardia juga menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada para dosen PEP Bandung yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan mereka. Dosen-dosen yang tidak hanya mengajarkan teori di ruang kelas, tetapi juga membimbing di laboratorium, mendampingi praktikum, membuka kesempatan penelitian, mengajak mahasiswa mengenal dunia industri, serta menanamkan disiplin dan tanggung jawab sebagai calon profesional di bidang energi dan pertambangan.

Hari itu, ucapan terima kasih terasa mempunyai makna yang berbeda. Mungkin dahulu ada tugas yang terasa berat, praktikum yang melelahkan, laporan yang harus berulangi kali diperbaiki, atau nasihat dosen yang belum sepenuhnya dipahami. Namun ketika toga telah dikenakan, semua itu menjelma menjadi bagian dari kenangan yang berharga.



Cardia menyampaikan kesan dan pesan mewakili wisudawan

Di antara wajah-wajah bahagia teman-temannya dan tatapan bangga para orang tua, Cardia menutup perjalanan sebagai mahasiswa dengan sebuah kehormatan lain. Namanya diumumkan sebagai Wisudawan Terbaik PEP Bandung Tahun 2026. Lulusan Program Studi Teknologi Metalurgi itu menyelesaikan pendidikan Diploma Tiga dengan IPK 3,94, sekaligus menjadi mahasiswa terbaik Program Studi Teknologi Metalurgi.

Tepuk tangan yang mengiringinya hari itu seakan menjadi penanda dari perjalanan panjang yang telah dilalui.

Namun, angka 3,94 tentu tidak dapat menceritakan seluruh perjalanan Cardia. Di balik angka itu ada lembar-lembar catatan yang ditulisnya, waktu yang dihabiskan di laboratorium, diskusi bersama teman, pengalaman menjadi asisten laboratorium, organisasi, penelitian, seminar, kunjungan industri, hingga kesempatan magang yang mempertemukannya secara langsung dengan dunia industri metalurgi.

Ada keberanian menentukan pilihan. Ada ketekunan menjalani proses. Ada pula kemauan untuk mengambil kesempatan demi kesempatan yang datang.

Dan menariknya, perjalanan yang akhirnya membawanya berdiri di podium wisuda itu bermula dari sesuatu yang sangat sederhana: kecintaannya pada kimia dan matematika.

Berawal dari Kimia dan Matematika

Jika hari itu Cardia berdiri di podium wisuda sebagai mahasiswa terbaik, tiga tahun

sebelumnya ia datang ke PEP Bandung sebagai seorang lulusan SMA yang sedang menentukan arah masa depannya.

Cardia merupakan lulusan SMA Harapan Kasih Bandung. Semasa SMA, ada dua mata pelajaran yang cukup menonjol dalam dirinya:



kimia dan matematika. Ketika tiba waktunya memilih perguruan tinggi, ia mencoba mengenali kemampuan dan minatnya sendiri. Pada saat yang sama, orang tuanya berharap Cardia dapat melanjutkan pendidikan di Bandung. Dari pencarian itulah ia mengenal Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung.

Program Studi Teknologi Metalurgi ditempatkannya sebagai pilihan pertama, sedangkan Teknologi Pertambangan menjadi pilihan kedua. Pilihan yang ketika itu mungkin terlihat seperti satu keputusan di antara banyak kemungkinan, ternyata menjadi pintu masuk bagi perjalanan yang kelak membawanya menjadi Wisudawan Terbaik PEP Bandung.

Menariknya, pilihan tersebut merupakan keputusan Cardia sendiri. Orang tuanya sebenarnya sempat berharap ia memilih pendidikan yang berkaitan dengan dunia kesehatan. Namun Cardia merasa bidang itu bukan jalan yang paling sesuai dengan minat dan kemampuannya.

"Dulu keinginan orang tua sebenarnya saya masuk ke dunia kesehatan. Tetapi saya merasa tidak cocok dan takut justru menjadi kendala jika dipaksakan," tuturnya.

Cardia memilih mengenali dirinya sendiri. Ia berani mengambil jalan yang diyakininya,

tentu tanpa mengabaikan pertimbangan dan harapan orang tua.

Pilihan itu kemudian tidak berhenti sebagai sebuah keputusan. Ia pertanggungjawabkan melalui kesungguhan belajar.

Menulis untuk Memahami

Jika ditanya apa rahasia di balik IPK 3,94, Cardia ternyata tidak mempunyai rumus yang terlalu rumit. Salah satu jawabannya justru sangat sederhana: menulis. "Saya akan lebih paham pada materi yang saya tulis dibandingkan hanya saya baca," ungkapnya.

Cara belajar Cardia memadukan tiga hal: menulis, membaca, dan mendengar. Namun dari ketiganya, menulis menjadi cara yang paling dominan. Apa yang diterimanya dari dosen tidak berhenti sebagai sesuatu yang didengar. Ia menuliskannya kembali, mencoba memahami, lalu menghubungkannya dengan materi lain.

Kebiasaan tersebut tidak hanya dilakukan untuk catatan perkuliahan. Cardia juga rajin menuliskan hasil praktikum dan berbagai kegiatan kampus. Sebagian tulisannya bahkan berkembang menjadi berita kegiatan maupun publikasi.

Baginya, menulis mempunyai makna lebih dari sekadar merangkai kata. Menulis adalah cara untuk memahami.

Barangkali dari kebiasaan sederhana itulah salah satu fondasi prestasinya dibangun. Prestasi ternyata tidak selalu dimulai dari sesuatu yang luar biasa. Kadang-kadang ia tumbuh dari kebiasaan kecil yang dilakukan dengan tekun: membuka buku, mendengarkan penjelasan dosen, membuat catatan, membaca kembali, lalu mencoba memahami dengan caranya sendiri.

Sedikit demi sedikit. Catatan demi catatan. Semester demi semester. Hingga akhirnya angka 3,94 tercatat pada akhir perjalanan akademiknya.

Belajar Tidak Cukup di dalam Kelas Namun Cardia memahami bahwa menjadi mahasiswa Teknologi Metalurgi tidak cukup hanya pandai membaca buku dan membuat catatan.

■ Profil

Teori harus bertemu dengan praktik.

Ada bahan yang harus diamati, sampel yang harus dipersiapkan, alat yang harus dikenali, proses yang harus dijalankan, dan hasil yang harus dianalisis.

Karena itulah laboratorium menjadi salah satu ruang belajar penting bagi Cardia.

“Mencoba langsung dan aktif selama praktikum juga menjadi salah satu cara saya belajar dan memahami teori yang diajarkan di kelas,” katanya.

Sistem pendidikan vokasi di PEP Bandung yang memberikan porsi besar pada kegiatan praktik dirasakan sangat membantunya. Melalui praktikum, teori yang sebelumnya hanya hadir dalam buku dan penjelasan dosen berubah menjadi sesuatu yang dapat diamati dan dikerjakan secara langsung.

Keseriusannya di laboratorium kemudian membawanya memperoleh kesempatan menjadi asisten laboratorium. Cardia terlibat dalam praktikum fisika, kimia, dan pengolahan mineral. Ia juga membantu menyiapkan sampel untuk kegiatan praktikum maupun penelitian.

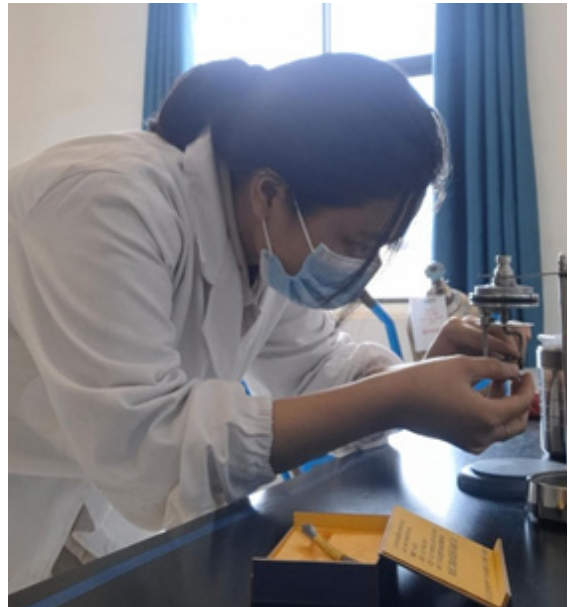
Kesempatan menjadi asisten laboratorium memberikan pengalaman yang berbeda. Ia tidak lagi hanya belajar untuk dirinya sendiri. Ada saatnya Cardia harus membantu mahasiswa lain memahami kegiatan yang dilakukan.

Dari sana ia belajar bahwa pengetahuan akan semakin bermakna ketika dapat dibagikan. Ketelitian, kedisiplinan, tanggung jawab, dan kemampuan berkomunikasi pun tumbuh bersama pengalamannya di laboratorium.

Dari Laboratorium Menuju Dunia Industri

Bagi Cardia, belajar metalurgi juga berarti melihat bagaimana ilmu yang diperoleh di kampus benar-benar digunakan di lapangan.

Kesempatan itu diperolehnya melalui berbagai kunjungan industri. Saat mengunjungi PT Smelting, Cardia melihat lebih dekat proses peleburan dan pemurnian tembaga, terutama penerapan pirometalurgi dan



elektrometalurgi. Sementara kunjungannya ke PT Bumi Suksesindo (BSI) memperkenalkannya pada pengolahan bijih emas berkadar rendah menggunakan metode *heap leach*.

Apa yang sebelumnya dipelajari melalui diagram, buku, dan penjelasan di ruang kuliah kini berdiri di hadapannya dalam bentuk proses industri yang sesungguhnya.

Pengalaman tersebut semakin lengkap ketika pada Agustus 2025 Cardia menjalani magang di CNGR Advanced Material Co., Ltd.

Di PT Nadesico Nickel Industry, ia memperoleh pengalaman mengoperasikan sejumlah instrumen analisis seperti Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), Inductively Coupled Plasma (ICP), X-Ray Fluorescence (XRF), spektrofotometer UV-Vis, serta peralatan pengujian batubara untuk analisis kualitas. Di PT CNGR Ding Xing New Energy, ia juga memperoleh pengalaman mengoperasikan *vertical mill* melalui sistem ruang kendali berbasis komputer.

Di sinilah ruang kuliah, laboratorium, dan industri seperti tersambung menjadi satu rangkaian pembelajaran.

Cardia semakin memahami bahwa proses pengolahan mineral dan logam bukan hanya tentang teori dan perhitungan. Di



dalamnya ada ketelitian analisis, penguasaan peralatan, pengendalian proses, keselamatan kerja, kualitas produk, serta tanggung jawab profesional.

Laboratorium mengajarkannya memahami proses.

Industri mengajarkannya bagaimana ilmu itu bekerja dalam dunia nyata. Ketika Ilmu Bertemu Penelitian. Rasa ingin tahu Cardia tidak berhenti pada kegiatan perkuliahan dan praktikum.

Ia juga memperoleh kesempatan terlibat dalam kegiatan penelitian. Salah satunya mengenai perbandingan reagen ekstraksi emas, yang kemudian dipublikasikan pada ITI Technopex 2024.

Dalam penelitian lainnya mengenai *anode slime*, Cardia terlibat dalam preparasi sampel untuk analisis pelindian, analisis persentase ekstraksi dengan variasi jalur proses, hingga kajian pengaruh luas permukaan karbon aktif terhadap adsorpsi emas. Kegiatan tersebut kemudian dipublikasikan pada TPT XXXIII PERHAPI 2024.

Bagi seorang mahasiswa Diploma Tiga, keterlibatan dalam penelitian memberikan pengalaman tersendiri.

Cardia tidak hanya membaca bagaimana penelitian dilakukan. Ia ikut merasakan prosesnya: menyiapkan sampel, melakukan analisis, melihat data, dan memahami bahwa sebuah kesimpulan ilmiah harus lahir dari proses yang dapat dipertanggungjawabkan.

Pada 2024, Cardia juga terpilih



sebagai *Most Favorite Outstanding Student* PEP Bandung. Dalam kegiatan tersebut ia mengangkat potensi dan strategi pengembangan *Rare Earth Element* di Indonesia.

Satu demi satu kesempatan datang.

Dan Cardia memilih untuk mengambilnya. Prestasi Bukan Hanya Tentang Nilai. Di tengah kesibukan akademik, Cardia tidak menjadikan ruang kuliah sebagai satu-satunya tempat untuk bertumbuh.

Ia aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknologi Metalurgi (HMTM) pada bidang pendidikan, penelitian, dan pengembangan. Salah satu kegiatannya adalah memfasilitasi belajar bersama bagi mahasiswa yang mengalami kesulitan pada mata kuliah tertentu. Ia juga ikut menyelenggarakan pembelajaran bahasa Mandarin bagi anggota HMTM.

Cardia kemudian dipercaya menjadi Sekretaris Umum Dewan Perwakilan Mahasiswa (DPM) PEP Bandung, termasuk terlibat dalam penyusunan dan perancangan aturan organisasi DPM.

Berbagai kegiatan lainnya semakin memperkaya pengalamannya. Ia pernah menjadi *liaison officer*, pembawa acara, terlibat dalam desain kegiatan, serta mengikuti pengabdian kepada masyarakat dengan memberikan pembelajaran kepada siswa SMK mengenai pengolahan limbah menjadi logam bernilai.

Dari organisasi, Cardia belajar sesuatu yang tidak selalu ditemukan dalam buku.

■ Profil

la belajar berkomunikasi. Belajar bekerja bersama orang lain. Belajar menyampaikan gagasan. Belajar menerima perbedaan. Belajar memimpin. Belajar bertanggung jawab.

Dan mungkin yang paling penting, ia belajar bahwa prestasi akademik akan menjadi lebih bermakna ketika berjalan bersama kemampuan untuk berinteraksi dan memberi manfaat kepada orang lain.

Bekal profesional Cardia juga diperkuat melalui berbagai sertifikasi. Pada 2026 ia memperoleh sertifikasi BNSP di bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), operator elektrolisis, serta teknisi pengolahan mineral. Semua pengalaman itu perlahan membentuk dirinya.

Maka ketika Cardia akhirnya terpilih menjadi Wisudawan Terbaik PEP Bandung, penghargaan tersebut bukan semata-mata cerita tentang angka 3,94. Di belakang angka itu ada proses panjang untuk bertumbuh.



Tetap Menjadi Cardia

Kesibukan akademik tidak membuat Cardia kehilangan ruang untuk menikmati masa mudanya. Ia menyukai menonton, mendengarkan musik, bernyanyi, *traveling*, menjelajah kuliner, serta menulis dan melakukan publikasi.

Di satu waktu ia dapat serius mengenakan jas laboratorium, mengamati sampel, dan menghadapi tugas-tugas metalurgi. Pada waktu lainnya, ia menikmati musik, bernyanyi, melakukan perjalanan, menemukan tempat

makan baru, atau menuliskan pengalaman yang menarik perhatiannya.

Di antara berbagai kegemarannya, menulis seolah mempunyai tempat tersendiri.

Menulis adalah cara Cardia belajar.

Namun menulis juga menjadi caranya menyimpan perjalanan. Sebab sebuah pengalaman mungkin berlalu, tetapi ketika dituliskan, ia dapat tinggal lebih lama.

Setelah Wisuda, Perjalanan Baru Dimulai. Kini toga telah dikenakan. Predikat wisudawan terbaik telah diraih. Tetapi bagi Cardia, wisuda bukanlah garis akhir.

"Saya akan bekerja dan melanjutkan kuliah," katanya.

Dunia kerja akan menjadi ruang baru untuk menguji ilmu dan pengalaman yang diperolehnya selama di PEP Bandung. Pendidikan lanjutan kelak akan membuka kesempatan untuk memperdalam pengetahuan dan memperluas cakrawala keilmuannya.

Predikat wisudawan terbaik tentu menjadi kebanggaan. Namun penghargaan itu sekaligus membawa sebuah tanggung jawab: bagaimana ilmu dan prestasi yang telah diperoleh dapat diterjemahkan menjadi karya dan kontribusi nyata.

Pesan untuk Adik Tingkat

Ketika diminta menyampaikan pesan kepada mahasiswa PEP Bandung yang masih menjalani perkuliahan, Cardia ternyata tidak hanya berbicara tentang IPK atau bagaimana mendapatkan nilai tinggi. Ia justru berbicara tentang kesempatan. "Selagi muda dan selagi menjadi mahasiswa, eksplor semua kegiatan positif yang bisa dilakukan, karena kampus kita banyak menyediakan wadah kreativitas untuk mahasiswa," pesannya.

Ia juga mengingatkan adik-adik tingkatnya agar tidak mudah menyerah ketika menghadapi mata kuliah yang terasa sulit.

"Jangan pernah menyerah akan mata kuliah yang dijalani saat ini. Susah atau mudahnya, itu semua akan menjadi kenangan yang tidak bisa diulang dua kali setelah kalian lulus."

Barangkali pesan itu baru benar-benar terasa ketika seseorang telah mengenakan toga. Ada ruang kelas yang kelak dirindukan. Ada praktikum yang dahulu melelahkan tetapi suatu hari menjadi cerita. Ada tugas yang pernah membuat pusing, dosen yang terus membimbing, teman-teman seperjuangan, perjalanan lapangan, laboratorium, organisasi, kunjungan industri, hingga canda di sela-sela kesibukan kuliah.

Cardia telah mencoba menjalankan kalimat itu. Ia mengambil kesempatan untuk belajar. Kesempatan menulis. Kesempatan mengikuti praktikum. Kesempatan menjadi asisten laboratorium. Kesempatan melakukan penelitian. Kesempatan berorganisasi. Kesempatan mengikuti kegiatan ilmiah. Kesempatan mengunjungi industri. Kesempatan magang. Kesempatan bertemu dan belajar dari banyak orang.

Tidak semua kesempatan menghasilkan piala atau penghargaan.

Namun setiap kesempatan meninggalkan pengalaman. Dan kumpulan pengalaman itulah yang akhirnya membawanya kembali ke sebuah momen pada 12 Agustus 2026.

Ke podium wisuda.

Kali ini Cardia berdiri bukan sebagai mahasiswa baru yang masih mencari jalan. Ia berdiri mewakili teman-temannya, membawa rasa bahagia para wisudawan, kebanggaan orang tua, serta rasa terima kasih kepada para dosen PEP Bandung yang telah mengajar dan membimbing perjalanan mereka.

Kemudian namanya disebut sebagai Wisudawan Terbaik PEP Bandung Tahun 2026.

Sebuah perjalanan seperti menemukan titik temunya. Dahulu, Cardia datang sebagai lulusan SMA yang menyukai kimia dan matematika. Tiga tahun kemudian, ia meninggalkan kampus dengan membawa ilmu, pengalaman, persahabatan, cerita, dan sebuah predikat membanggakan.

Namun perjalanan Cardia belum selesai. Di luar gerbang kampus, dunia yang lebih luas telah menantinya. Akan ada kesempatan baru, tantangan baru, raihlah prestasi dan teruslah berjuang.

Jika tiga tahun di PEP Bandung telah mengajarkannya sesuatu, mungkin inilah salah satunya: **peluang perlu diraih, proses perlu dijalani, dan prestasi akan menemukan jalannya.**

Perjalanan Cardia, dari ruang kuliah dan laboratorium hingga akhirnya berdiri di podium sebagai wisudawan terbaik, menghadirkan kesan tersendiri bagi saya. Ada ketekunan, kesungguhan, dan keberanian untuk terus mencoba di balik setiap pencapaiannya. Apresiasi yang besar terhadap perjalanan itulah yang kemudian menggerakkan saya untuk meracik beberapa bait sederhana menjadi sebuah lagu khusus untuk Cardia.

Semoga lirik ini bukan sekadar menjadi kenangan atas sebuah pencapaian, tetapi juga menjadi bekal semangat bagi Cardia untuk terus melangkah maju. Sebab wisuda bukanlah akhir perjalanan, melainkan awal dari jalan yang lebih panjang untuk membawa ilmu, mengabdikan, dan meraih masa depan yang gemilang.

LAGU UNTUK CARDIA

*Dari ilmu kimia kau temukan jalan
Merajut mimpi menggapai cita
Berebel tekad menatap masa depan
Langkah sederhana menjadi nyata*

*Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Telah membesarkanmu dan berjasa
Tempat menempa diri meraih harapan
Menuntun langkah menggapai asa*

*Cardia, teguhkan dalam diri
Terus melangkah dan berjuang
Bawa ilmu mengabdikan pada negeri
Raih masa depan yang gemilang*

Penulis:
DOSEN PEP BANDUNG.

Toksisitas Merkuri pada Kesehatan Manusia Tragedi Minamata Sebagai Pelajaran

Oleh : Chelin Zelivia Rivera



Pembakaran amalgam emas di ruang terbuka, aktivitas pertambangan rakyat, lokasi di Gunung Pani, Gorontalo (Suhandi, dkk., 2005)

Sumber Merkuri dalam Sistem Bumi

Merkuri sudah lama diketahui menjadi bagian dari sistem alami Bumi, yakni tersimpan di dalam batuan, terutama dalam mineral sinabar, lalu perlahan terdispersi secara alami melalui pelapukan terhadap deposit merkuri. Dalam kondisi alami, pelepasan ini terjadi dalam jumlah kecil dan tersebar, sehingga lingkungan masih mampu menyeimbangkannya. Siklus geokimia bekerja dengan cara yang stabil, membuat merkuri tetap berada dalam batas yang tidak merusak ekosistem secara luas.

Artinya, keberadaan merkuri dari proses alami pada dasarnya tidak selalu menjadi ancaman serius bagi lingkungan. Alam memiliki mekanisme untuk menyerap, menyebarkan, dan menetralkan unsur tersebut dalam skala tertentu. Gangguan baru muncul ketika jumlah yang dilepaskan jauh melampaui kemampuan alam untuk menanganinya.

Di sinilah peran aktivitas manusia menjadi sangat penting. Industri kimia dan petrokimia, pembakaran batu bara, serta limbah yang tidak dikelola dengan baik telah meningkatkan jumlah merkuri secara drastis. Selain itu, pertambangan emas skala kecil juga memberikan kontribusi besar karena masih menggunakan merkuri dalam proses pengolahan emas.

Di lapangan, prosesnya terlihat sederhana. Merkuri dicampurkan ke dalam bijih emas untuk mengikat partikel emas yang halus. Setelah itu, campuran dipanaskan agar emas dapat dipisahkan. Namun pada tahap ini, merkuri berubah menjadi uap beracun dan terlepas ke udara. Uap tersebut tidak hanya mencemari area sekitar, tetapi juga dapat terbawa angin ke wilayah yang jauh sebelum akhirnya kembali ke permukaan melalui hujan.

Ketika jumlah merkuri yang masuk ke lingkungan terus meningkat, keseimbangan

alami yang sebelumnya mampu menjaganya mulai terganggu. Pada titik ini, merkuri tidak lagi sekadar mengikuti siklus alam, tetapi berubah menjadi beban yang menumpuk di tanah, air, dan udara. Dari sinilah masalah yang awalnya tidak terlihat perlahan berkembang menjadi ancaman nyata bagi lingkungan dan kehidupan manusia.

Sifat Fisika dan Kimia

Merkuri memiliki sifat yang membuatnya cukup unik sekaligus berbahaya dalam konteks geologi lingkungan. Secara fisika, ia berwarna perak mengilap dan berbentuk cair pada suhu kamar. Massa jenisnya tinggi, sehingga terasa berat meskipun volumenya kecil, dan ia dapat bergerak serta mengalir dengan mudah di permukaan. Salah satu sifat yang paling penting adalah kemampuannya untuk menguap. Pada suhu ruang sekalipun, merkuri dapat berubah menjadi uap yang tidak terlihat, dan uap inilah yang berbahaya karena dapat terhirup dan langsung masuk ke dalam sistem pernapasan manusia.

Dari sisi kimia, merkuri tergolong unsur yang persisten. Merkuri tidak mudah terurai dan dapat bertahan lama di lingkungan, baik di udara, air, maupun tanah. Dalam sistem geologi, sifat ini membuat merkuri mampu berpindah dari satu kompartemen ke kompartemen lain, lalu tersimpan dalam waktu yang panjang, terutama di sedimen sungai dan laut. Sedimen ini kemudian menjadi semacam penyimpanan alami yang dapat melepaskan kembali merkuri ke lingkungan dalam kondisi tertentu.

Selain hadir dalam bentuk unsur bebas, merkuri juga banyak ditemukan secara alami dalam bentuk mineral, terutama mineral *Cinnabar* (HgS) atau sinabar. Mineral ini merupakan bijih utama merkuri yang berwarna merah terang dan umumnya terbentuk pada lingkungan hidrotermal. Dalam kondisi alami, cinnabar relatif stabil, namun melalui proses pelapukan atau aktivitas manusia seperti penambangan dan pemanasan, merkuri dapat terlepas ke lingkungan dalam bentuk yang lebih reaktif dan berbahaya.

Merkuri hadir dalam beberapa bentuk



Ibu-ibu mendulang air raksa dari tailing tambang rakyat, lokasi di Sungai Buladu, Gorontalo (Widhiyatna, dkk., 2005)



Merkuri dalam bentuk cair (sumber: George Osodi/Panos Pictures, ResearchGate)

yang berbeda, dan masing-masing memiliki karakteristik yang memengaruhi cara penyebarannya di lingkungan serta dampaknya terhadap kesehatan. Merkuri elemental umumnya ditemukan dalam bentuk cair atau uap dan mudah masuk ke tubuh melalui pernapasan. Merkuri anorganik biasanya berupa senyawa garam yang dapat masuk melalui air atau makanan yang terkontaminasi. Sementara itu, merkuri organik seperti metilmerkuri merupakan bentuk yang paling berbahaya karena dapat dengan mudah



Sampel sinabar (HgS), mineral utama penghasil merkuri di alam (sumber: Brooks, W. E., Cinnabar ore (~50 g), ResearchGate.)

menembus jaringan tubuh, terutama sistem saraf pusat.

Merkuri dalam Bentuk Organik

Peran merkuri dalam sistem geologi menjadi lebih kompleks ketika unsur ini mengalami perubahan bentuk di lingkungan. Di dalam perairan, terutama pada kondisi yang

kaya bahan organik dan aktivitas mikroba, merkuri anorganik dapat diubah menjadi metilmerkuri. Proses ini terjadi secara alami, tetapi dampaknya menjadi signifikan ketika jumlah merkuri yang tersedia meningkat akibat aktivitas manusia.

Metilmerkuri memiliki sifat yang membuatnya sangat berbahaya bagi makhluk hidup, yakni mudah larut dalam lemak, sehingga dapat menembus membran sel dan menyebar ke berbagai jaringan tubuh. Selain itu, zat ini sulit dikeluarkan dari tubuh, sehingga cenderung terakumulasi seiring waktu. Dalam tubuh manusia, metilmerkuri memiliki afinitas tinggi terhadap sistem saraf, sehingga dapat menyebabkan kerusakan yang bersifat permanen.

Dalam konteks ekologi, metilmerkuri bergerak melalui rantai makanan. Plankton menyerapnya dari air, kemudian dimakan oleh ikan kecil, lalu ikan kecil dimakan oleh ikan yang lebih besar. Pada setiap tingkat ini, konsentrasi merkuri meningkat melalui proses bioakumulasi dan biomagnifikasi.

Dari sudut pandang geologi lingkungan, proses ini menunjukkan bagaimana unsur yang awalnya tersebar di sedimen atau air

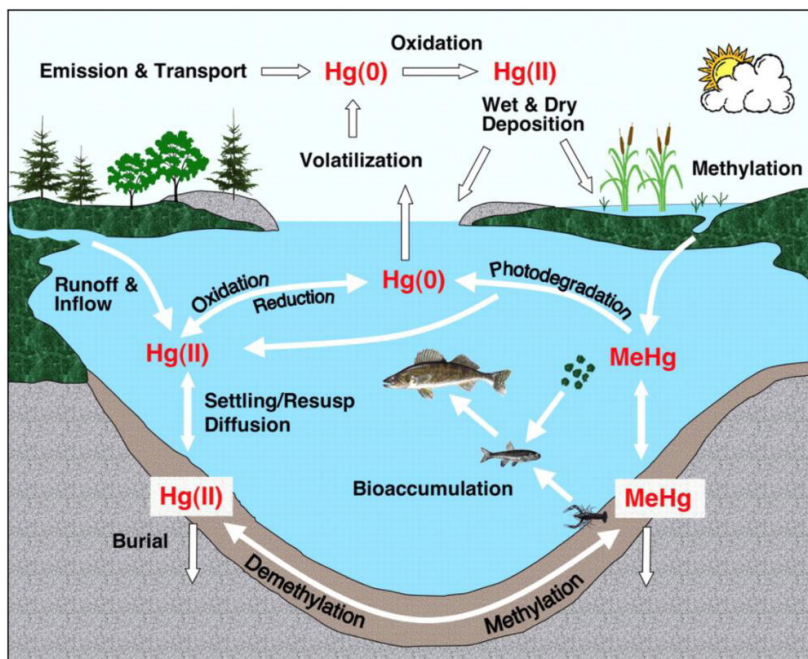


Diagram siklus merkuri di perairan yang menunjukkan perubahan bentuk merkuri (Hg^0 , Hg^{2+} , dan metilmerkuri/MeHg) serta proses bioakumulasi pada organisme air (sumber: <https://enviro.wiki>)

dapat kembali ke sistem biologis dalam bentuk yang jauh lebih berbahaya. Sedimen yang terkontaminasi tidak hanya menjadi tempat penyimpanan, tetapi juga sumber aktif yang terus memasok merkuri ke rantai makanan.

Manusia sebagai konsumen puncak berada pada posisi paling rentan. Paparan metilmerkuri sering terjadi melalui konsumsi ikan laut, terutama jenis yang berukuran besar. Dampaknya tidak selalu langsung terlihat, karena akumulasi terjadi secara perlahan, tetapi efeknya dapat sangat serius, terutama terhadap fungsi saraf dan perkembangan otak.

Tragedi Minamata

Salah satu contoh paling nyata yang memperlihatkan hubungan antara lingkungan dan kesehatan manusia adalah tragedi di Kota Minamata, Prefektur Kumamoto, Jepang. Awalnya, pencemaran ini tidak langsung terlihat sebagai ancaman besar. Ia bermula dari limbah industri yang dibuang ke perairan, sesuatu yang pada masa itu dianggap biasa saja.

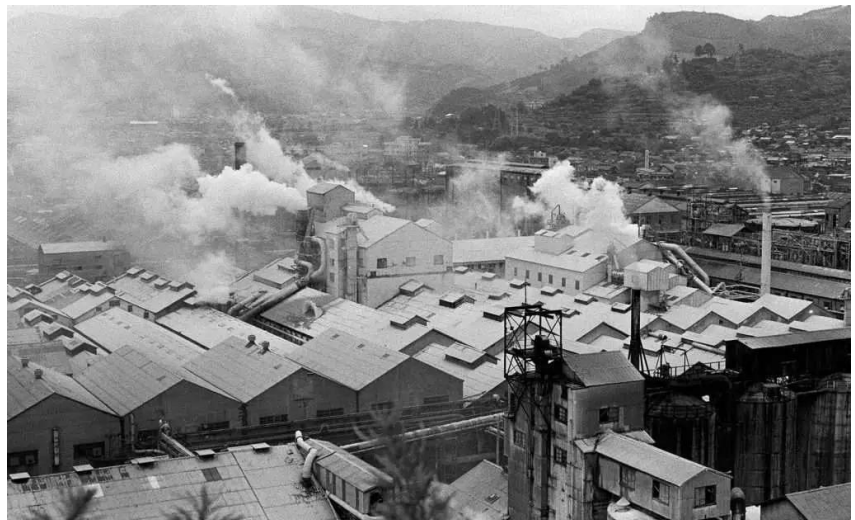
Sejak tahun 1932, limbah yang mengandung metilmerkuri dibuang ke Teluk Minamata, tanpa pengolahan yang memadai. Zat ini tidak hilang begitu saja. Ia mengendap di dasar perairan, tersimpan dalam sedimen, lalu perlahan masuk ke dalam tubuh organisme

laut. Ikan dan biota lainnya menjadi perantara tanpa disadari, membawa merkuri naik ke rantai makanan.

Masyarakat yang sehari-hari bergantung pada hasil laut mulai merasakan dampaknya, meskipun awalnya tidak langsung disadari sebagai sesuatu yang berbahaya. Kasus pertama baru dikenali pada tahun 1956. Gejalanya cukup mengkhawatirkan, mulai dari mati rasa di tangan dan kaki, tubuh yang sulit dikendalikan, hingga gangguan penglihatan dan bicara. Seiring waktu, kondisi ini memburuk pada banyak orang, bahkan berujung pada kelumpuhan dan kematian.

Efek penyakit Minamata tidak langsung muncul setelah paparan metilmerkuri, melainkan umumnya berlangsung beberapa minggu hingga bulan setelah mengonsumsi makanan laut yang tercemar, bahkan pada beberapa kasus bisa lebih lama tergantung jumlah merkuri, frekuensi paparan, dan kondisi tubuh, terutama pada anak-anak dan ibu hamil. Pada tahap awal, gejala sering kali ringan dan tidak disadari, seperti kesemutan, gangguan penglihatan, sulit berjalan, dan tremor. Seiring waktu, kondisi berkembang menjadi gangguan koordinasi, bicara pelo, serta penurunan fungsi sensorik. Dalam jangka panjang, paparan ini menyebabkan kerusakan permanen pada sistem saraf yang dapat berujung pada kelumpuhan, gangguan mental, hingga

Chisso Corporation Factory,
awal mula Tragedi Minamata
(sumber: researchgate.net)





Potret pilu dari Tragedi Minamata (sumber: <https://www.kompas.id/artikel/masa-depan-yang-kita-inginkan>)

dampak kongenital pada bayi sejak dalam kandungan. Karena kerusakan yang terjadi bersifat menetap, efek penyakit ini dapat berlangsung seumur hidup dan tidak dapat pulih sepenuhnya.

Yang paling menyayat justru terlihat pada anak-anak yang lahir kemudian. Bayi yang dilahirkan dari ibu yang terpapar mengalami gangguan perkembangan sejak awal, meskipun sang ibu terkadang hanya merasakan gejala ringan. Dari sini mulai terlihat bahwa dampaknya tidak berhenti pada satu orang saja, tetapi bisa terbawa ke generasi berikutnya.

Dampak tragedi Minamata tidak hanya dirasakan oleh manusia, tetapi juga oleh hewan di sekitarnya. Kucing-kucing menunjukkan perilaku tidak normal seperti kejang dan bergerak tidak terkendali hingga melompat ke laut, yang kemudian dikenal sebagai "*cat dancing disease*". Selain itu, burung ditemukan jatuh tiba-tiba, dan ikan di perairan ikut terpapar, menandakan bahwa merkuri telah menyebar luas dalam ekosistem.

Hal ini menunjukkan bahwa pencemaran di Minamata merupakan krisis lingkungan yang menyeluruh. Dampaknya bergerak melalui rantai makanan dan memengaruhi berbagai makhluk hidup, hingga akhirnya kembali ke manusia. Tragedi ini menjadi bukti bahwa

ketika lingkungan tercemar, seluruh sistem kehidupan ikut terdampak.

Implikasi Pencemaran Merkuri dan Strategi Pengendalian

Merkuri merupakan unsur alami dalam sistem Bumi yang bergerak melalui siklus geokimia dan umumnya masih dapat ditoleransi oleh lingkungan. Namun, pelepasan merkuri dalam jumlah besar akibat aktivitas manusia menyebabkan terganggunya keseimbangan alam dan menjadikannya sebagai polutan yang persisten serta sulit dikendalikan.

Sifat merkuri yang mudah menguap, sulit terurai, dan dapat berubah menjadi bentuk lebih beracun seperti metilmerkuri menjadikannya ancaman serius. Di perairan, metilmerkuri terbentuk secara alami dan masuk ke rantai makanan, mengalami akumulasi dari plankton hingga manusia sebagai konsumen puncak. Kasus Minamata menunjukkan bahwa pencemaran merkuri dapat berkembang menjadi krisis kesehatan serius dengan dampak jangka panjang, terutama kerusakan permanen pada sistem saraf yang bahkan dapat memengaruhi generasi berikutnya.

Pencemaran merkuri bukan hanya masalah lingkungan, tetapi juga kemanusiaan, karena proses pemulihannya sangat kompleks. Oleh karena itu, upaya pengendalian menjadi penting, seperti pengelolaan limbah yang aman, pengawasan aktivitas industri dan pertambangan, serta penerapan teknologi alternatif tanpa merkuri.

Selain itu, edukasi masyarakat dan peningkatan kesadaran terhadap risiko paparan, khususnya melalui konsumsi hasil perairan, juga diperlukan. Dengan menjaga keseimbangan antara aktivitas manusia dan sistem alam, dampak pencemaran merkuri dapat diminimalkan, sehingga kejadian seperti di Minamata tidak terulang di masa depan.

Penulis:
Mahasiswi Teknologi Geologi, Angkatan 2025

Timbal (Pb): Racun Diam-diam yang Persisten

Oleh: Khalif Rizki Varuska



Industri Timbal (<https://www.idntimes.com>)

Di antara berbagai polutan logam berat yang mengancam kesehatan manusia dan lingkungan, timbal (Pb) menempati posisi yang sangat mengkhawatirkan. Bukan karena ia paling banyak dibicarakan, justru sebaliknya. Timbal bekerja secara diam-diam, terakumulasi perlahan dalam tubuh dan tanah selama bertahun-tahun, hingga dampaknya menjadi permanen dan sulit dipulihkan.

Mengapa Timbal Berbahaya?

Timbal adalah logam berat berwarna kebiruan-abu-abu dengan nomor atom 82, memiliki titik leleh rendah (327°C), mudah dibentuk, dan tahan korosi. Kombinasi sifat-sifat inilah yang membuat timbal digunakan secara masif dalam industri selama berabad-abad, mulai dari pipa air peradaban

Romawi, pigmen cat, bahan bakar kendaraan, hingga baterai asam-timbal yang masih digunakan hingga hari ini.

Namun di balik kegunaannya, timbal menyimpan bahaya serius bagi makhluk hidup. Timbal bersifat neurotoksik, nefrotoksik, dan karsinogenik. Tidak ada ambang batas aman untuk paparan timbal setiap peningkatan kadar

timbal dalam darah, sekecil apapun, berkorelasi dengan penurunan fungsi kognitif, terutama pada anak-anak yang masih dalam fase perkembangan otak. WHO bahkan menyebut timbal sebagai salah satu dari sepuluh bahan kimia yang menjadi perhatian utama kesehatan masyarakat di dunia.

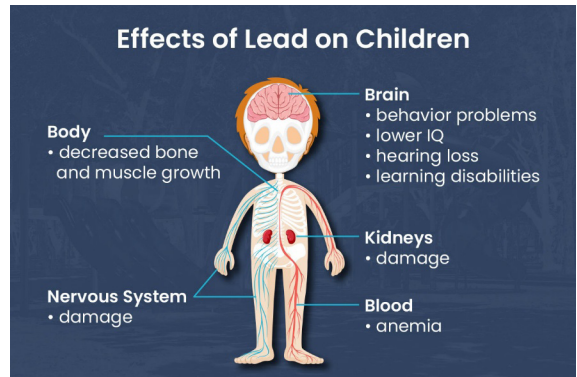
Sumber-Sumber Paparan Timbal

Paparan timbal pada manusia bersifat multi-jalur, dapat masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi (menghirup debu), ingesti (penelanan), maupun kontak kulit. Memahami sumber-sumber paparan ini sangat penting untuk merancang strategi pencegahan yang efektif.

Cat berbasis timbal telah digunakan selama berabad-abad karena kemampuannya memberikan warna yang cerah dan meningkatkan daya tahan. Bangunan yang dibangun sebelum era tahun 2000-an di banyak negara berkembang termasuk Indonesia sangat mungkin masih mengandung cat timbal. Bahaya utamanya muncul ketika cat mengelupas atau terganggu akibat renovasi, karena debu dan serpihan cat yang mengandung timbal dapat terhirup atau tertelan oleh anak-anak.

Pipa air timbal juga menjadi sumber paparan yang signifikan. Kata *plumbing* (pipa ledeng) bahkan berasal dari kata Latin *plumbum*, yang berarti timbal. Timbal dapat larut ke dalam air minum terutama air yang bersifat asam dalam proses yang disebut *leaching*. Krisis air, Flint, Michigan (2014 - 2019) menjadi salah satu kasus paling mencolok: pergantian sumber air kota menyebabkan pipa timbal tua terkorosi dan kadar timbal dalam air minum melonjak drastis, memengaruhi ribuan warga, terutama anak-anak.

Sumber lain yang tidak kalah penting adalah emisi industri dari peleburan logam, produksi baterai timbal-asam, serta industri kaca dan keramik. Bensin bertimbal yang digunakan hampir satu abad juga meninggalkan warisan berupa timbal yang terperangkap dalam lapisan tanah di tepi jalan raya di seluruh dunia. Produk konsumen seperti



Dampak keracunan timbal pada berbagai sistem organ tubuh (<https://www.clevelandohio.gov>)

mainan anak berkualitas rendah, perhiasan murah, dan kosmetik tradisional tertentu pun berpotensi mengandung timbal dalam kadar yang melebihi batas aman.

Bagaimana Timbal Merusak Tubuh?

Setelah masuk ke aliran darah, timbal didistribusikan ke seluruh organ tubuh dan akhirnya terakumulasi dalam tulang. Sekitar 90 - 95% timbal dalam tubuh manusia dewasa tersimpan dalam tulang dalam bentuk timbal fosfat, yang secara kimia mirip dengan kalsium fosfat. Inilah yang membuat tulang menjadi reservoir timbal jangka panjang paparan di masa kecil dapat berdampak hingga seseorang dewasa atau bahkan Lansia.

Pada sistem saraf, timbal mengganggu transmisi sinaptik dengan memblokir reseptor NMDA yang penting untuk pembentukan memori dan plastisitas otak. Timbal juga merusak integritas sawar darah-otak, memungkinkan lebih banyak zat berbahaya masuk ke jaringan otak. Pada anak-anak, dampaknya sangat serius karena otak yang sedang berkembang jauh lebih rentan. Penelitian oleh Lanphear et al. (2005) yang melibatkan lebih dari 1.300 anak dari tujuh negara menemukan bahwa setiap peningkatan kadar timbal darah sebesar 10 µg/dL berkorelasi dengan penurunan IQ rata-rata sebesar 4-5 poin bahkan pada kadar yang sebelumnya dianggap aman.

Timbal juga secara spesifik mengganggu

sintesis heme komponen utama hemoglobin yang mengangkut oksigen dalam darah sehingga menyebabkan anemia pada individu yang terpapar secara kronis. Pada ginjal, paparan timbal menyebabkan kerusakan tubulus proksimal dan penurunan laju filtrasi, yang dalam kasus parah dapat berujung pada gagal ginjal. Selain itu, studi epidemiologi berskala besar mengonfirmasi kaitan antara paparan timbal dan hipertensi, peningkatan risiko penyakit jantung koroner, serta komplikasi kehamilan termasuk berat lahir rendah dan gangguan perkembangan janin.

Kelompok yang Paling Rentan

Meskipun paparan timbal berbahaya bagi semua kelompok usia, anak-anak usia 0-6 tahun berada dalam posisi yang paling rentan. Anak-anak pada usia tersebut memiliki laju absorpsi timbal di saluran pencernaan yang jauh lebih tinggi (hingga 50%) dibanding orang dewasa (sekitar 10-15%). Perilaku eksplorasi dengan mulut (*mouthing behavior*) juga meningkatkan risiko penelanan debu dan tanah yang terkontaminasi. Ibu hamil dan janin juga sangat berisiko, karena timbal yang tersimpan dalam tulang ibu dapat dilepaskan ke aliran darah selama kehamilan dan menembus plasenta.

Pekerja di sektor peleburan logam, daur ulang baterai, dan pengecatan bangunan tua menghadapi risiko paparan yang jauh lebih

tinggi. Demikian pula penduduk yang tinggal di sekitar kawasan industri, terutama di negara berkembang di mana regulasi emisi masih lemah dan jarak antara permukiman dan fasilitas industri tidak memadai.

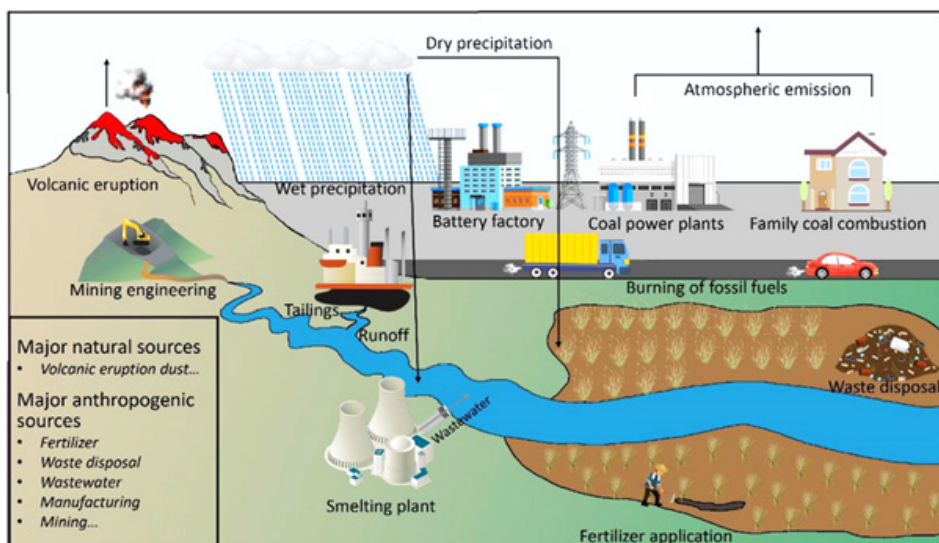
Mengapa Timbal Disebut “Persisten”?

Berbeda dengan banyak polutan organik yang dapat terurai melalui biodegradasi atau fotolisis, timbal sebagai unsur logam tidak dapat dihancurkan oleh proses alamiah apapun. Timbal hanya berpindah bentuk senyawa atau media lingkungan, namun tetap ada sebagai timbal. Begitu mencemari tanah atau air, ia akan bertahan selama ratusan tahun.

Konsentrasi timbal dalam tanah di kawasan perkotaan yang tercemar dapat mencapai ribuan mg/kg, jauh di atas konsentrasi alami sekitar 10 - 50 mg/kg. Studi pada sedimen sungai-sungai besar di dunia menunjukkan bahwa lapisan yang diendapkan sebelum era penghapusan bensin bertimbal mengandung kadar timbal yang secara signifikan lebih tinggi, membuktikan bahwa timbal dari era industri masih terperangkap dalam ekosistem kita hingga kini.

Di dalam tubuh, timbal memiliki waktu paruh biologis yang panjang: sekitar 35 hari

Sumber dari
pencemaran timbal,
Druzynska (2025)



dalam darah, 40 hari dalam jaringan lunak, dan hingga 20 - 30 tahun dalam tulang. Selain itu, timbal dapat berpindah dari tanah ke tanaman, dari tanaman ke hewan, dan akhirnya ke manusia melalui rantai makanan dalam proses yang disebut bioakumulasi.

Kondisi Pencemaran Timbal di Indonesia

Indonesia tidak luput dari masalah pencemaran timbal. Salah satu sumber paling signifikan adalah industri daur ulang baterai asam-timbal (aki) yang beroperasi secara informal dan tersebar luas, terutama di Pulau Jawa. Penelitian oleh Pure Earth dan Kementerian Lingkungan Hidup menemukan konsentrasi timbal yang sangat tinggi dalam tanah dan bahkan dalam darah anak-anak yang tinggal di sekitar industri ini kadar timbal darah pada beberapa lokasi dilaporkan jauh melebihi ambang intervensi medis 3,5 µg/dL yang ditetapkan CDC.

Survei oleh IPEN (International Pollutants Elimination Network) secara konsisten menemukan bahwa sejumlah cat dekoratif yang beredar bebas di pasaran Indonesia masih mengandung timbal melebihi batas yang diperbolehkan. Meski bensin bertimbal sudah dihentikan sejak 2006, lapisan tanah di tepi jalan-jalan besar di kota-kota besar masih menyimpan warisan kontaminasi dari era sebelumnya. Kawasan pertambangan timah di Bangka Belitung dan pengolahan logam di berbagai wilayah juga menghasilkan limbah yang berpotensi mencemari tanah dan air di sekitarnya.

Deteksi dan Penanganan

Keracunan timbal sering kali tidak menunjukkan gejala yang spesifik pada kadar rendah hingga sedang, sehingga sering disebut sebagai *silent disease* (penyakit tanpa suara). Pada kadar yang lebih tinggi, gejala yang mungkin muncul antara lain sakit kepala, kelelahan, nyeri perut, dan mual. Pada anak-anak, tanda yang perlu diwaspadai meliputi keterlambatan perkembangan, kesulitan belajar, dan hiperaktivitas.

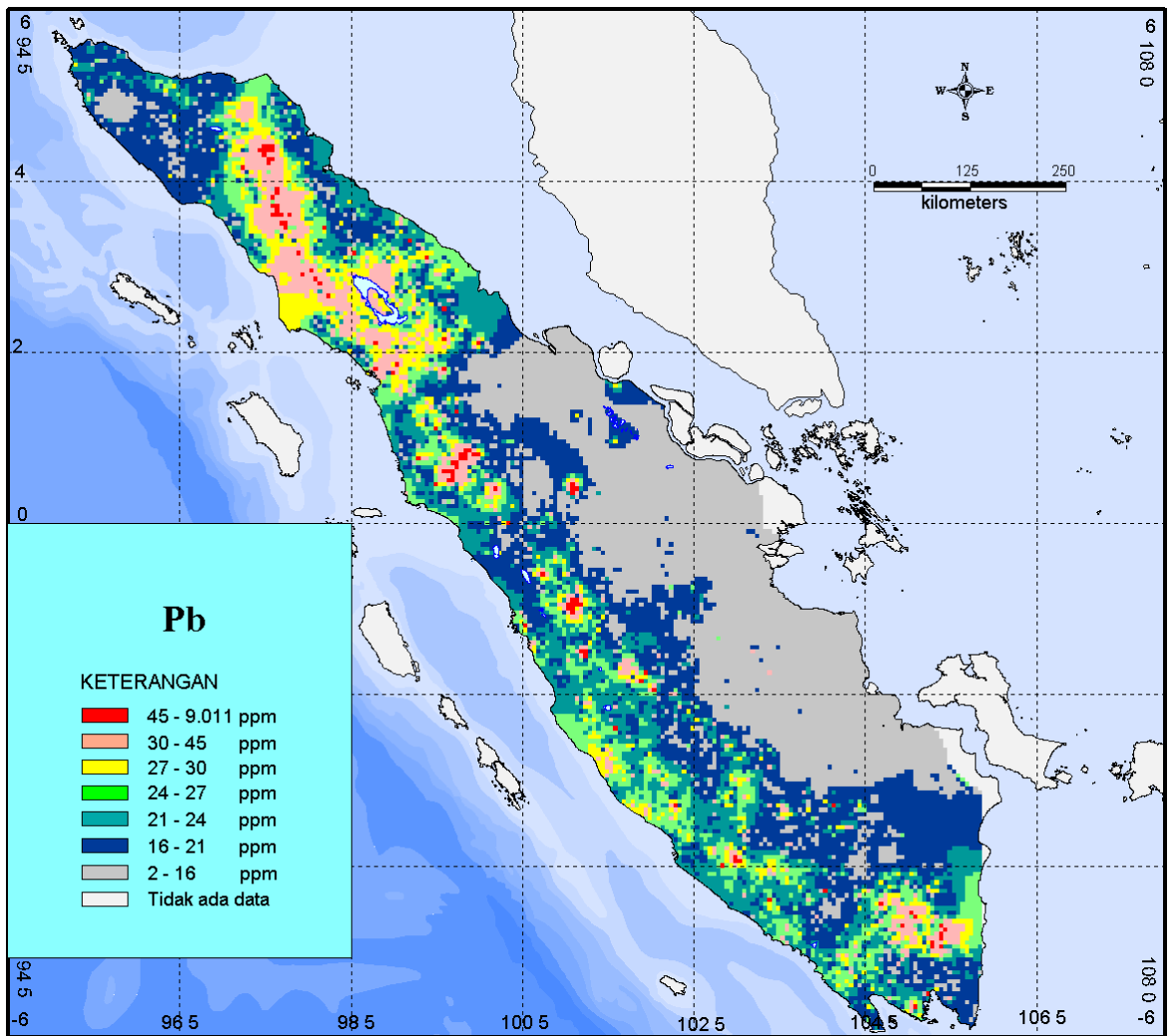
Diagnosis dilakukan melalui pengukuran kadar timbal dalam darah (*blood lead level/ BLL*). CDC merekomendasikan skrining rutin pada anak usia 1 dan 2 tahun, terutama bagi mereka yang tinggal di lingkungan berisiko tinggi. Di Indonesia, skrining timbal darah masih sangat terbatas dan belum menjadi bagian dari program kesehatan anak nasional yang rutin.

Untuk kasus dengan kadar timbal darah sangat tinggi, terapi khelasi (*chelation therapy*) menggunakan agen seperti succimer (DMSA) dapat dilakukan untuk memfasilitasi ekskresi timbal melalui urin. Namun penting diketahui bahwa khelasi tidak dapat membalikkan kerusakan neurologis yang sudah terjadi. Asupan kalsium, zat besi, dan vitamin C yang cukup terbukti dapat mengurangi absorpsi timbal di saluran pencernaan, sehingga nutrisi yang baik berperan penting sebagai langkah pencegahan.

Upaya Pengendalian dan Langkah ke Depan

Pada tingkat global, UNEP bersama WHO menginisiasi Global Alliance to Eliminate Lead Paint (GAELP) yang mendorong negara-negara mengadopsi regulasi pelarangan cat berbasis timbal. Program penghapusan bensin bertimbal yang berhasil mencapai target globalnya pada tahun 2021 ketika Aljazair menjadi negara terakhir yang menghentikannya merupakan salah satu keberhasilan lingkungan terbesar dalam sejarah.

Di Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menetapkan baku mutu untuk logam berat. Namun implementasi dan penegakannya masih perlu diperkuat. Langkah yang perlu terus didorong antara lain: regulasi pembatasan timbal dalam produk yang lebih ketat, peningkatan kapasitas laboratorium pengujian, program skrining timbal darah anak secara nasional, edukasi masyarakat bagi ibu hamil dan orang tua, serta formalisasi industri daur ulang baterai dengan teknologi yang lebih bersih dan ramah lingkungan. Pada level individu, masyarakat dapat berperan dengan memastikan sumber



Sebaran unsur timbal di Pulau Sumatra, sampel endapan sungai aktif, -80 mesh (Suprpto, 2008).

air minum aman, memilih cat berlabel standar keamanan, dan mendukung program daur ulang baterai yang bertanggung jawab.

Penutup

Timbal mungkin tidak menimbulkan gejala yang langsung terasa. Tidak ada asap tebal, tidak ada bau menyengat, tidak ada rasa nyeri tiba-tiba. Namun justru itulah yang membuatnya menjadi ancaman yang begitu berbahaya: timbal bekerja diam-diam, merusak secara perlahan, dan meninggalkan jejak yang sangat sulit untuk dihapus baik dalam tubuh manusia maupun di lingkungan.

Pengetahuan ilmiah kita tentang bahaya timbal sudah sangat memadai. Yang masih kurang adalah kemauan kolektif kebijakan yang tegas, penegakan hukum yang konsisten, dan partisipasi masyarakat yang aktif. Generasi yang lahir bebas dari paparan timbal akan tumbuh dengan otak yang lebih sehat, potensi yang lebih penuh, dan masa depan yang lebih cerah. Itulah mengapa perjuangan melawan racun diam-diam ini layak untuk terus diperjuangkan.

Penulis:
Mahasiswa Teknologi Geologi, Angkatan 2025.

Mineral Monasit Dalam Dua Sisi Bahaya Radioaktif atau Sumber Daya Strategis?

Oleh: Siti Mutiara Cahyani

Perkembangan teknologi modern telah meningkatkan kebutuhan terhadap unsur tanah jarang, yang merupakan komponen penting dalam berbagai aplikasi industri seperti kendaraan listrik, perangkat elektronik, dan energi terbarukan. Salah satu mineral utama yang mengandung REE adalah monasit, banyak ditemukan pada endapan aluvial maupun batuan granitik.



Pasir monasit dan angka paparan radiasinya sebesar $\pm 38,12 \mu\text{Sv/jam}$. Sampel koleksi Laboratorium PEP Bandung

Namun, monasit tidak hanya mengandung REE, tetapi juga unsur radioaktif seperti thorium dan uranium. Kandungan ini menimbulkan potensi risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, terutama pada kegiatan penambangan dan pengolahan. Kondisi tersebut menimbulkan dilema dalam pemanfaatan monasit: di satu sisi sebagai sumber daya strategis, dan di sisi lain sebagai potensi bahaya paparan radiasinya.

Mineral Monasit

Monasit adalah mineral fosfat alami yang kaya akan unsur tanah jarang (*rare earth elements* / REE) dengan rumus kimia umum $(\text{Ce, La, Nd, Th})\text{PO}_4$, tersusun atas unsur seperti cerium, lanthanum, neodmium, serta thorium yang menyebabkan punya sifat radioaktif. Mineral ini memiliki ciri fisik berupa warna kuning kecoklatan hingga coklat kemerahan, kilap resin hingga kaca, kekerasan sedang

(5–5,5 skala Mohs), dan berat jenis tinggi sehingga tergolong sebagai mineral berat. Monasit umumnya ditemukan pada endapan aluvial seperti pasir pantai, sungai, serta pada batuan granit dan metamorf. Di Indonesia sering dijumpai sebagai mineral ikutan dalam penambangan timah di wilayah seperti Bangka, Belitung dan Kalimantan.

Secara ekonomi, monasit sangat penting karena menjadi sumber utama REE yang digunakan dalam berbagai teknologi modern seperti elektronik, kendaraan listrik, dan magnet permanen, serta mengandung thorium yang berpotensi sebagai sumber energi nuklir alternatif, meskipun di sisi lain juga menimbulkan risiko radiasi sehingga memerlukan pengelolaan yang hati-hati.

Sumber Radiasi pada Monasit

Radiasi dari monasit berasal dari peluruhan unsur radioaktif, terutama: Thorium-232 (Th-232) dan Uranium-238 (U-238). Peluruhan ini menghasilkan radiasi alfa, radiasi beta, dan radiasi gamma. Dalam kondisi alami (misalnya di endapan pasir pantai), tingkat radiasi monasit umumnya masih dalam batas aman. Namun, risiko meningkat ketika mineral ditambang dalam jumlah besar, diproses secara industri, dan limbah radioaktif tidak dikelola dengan baik.

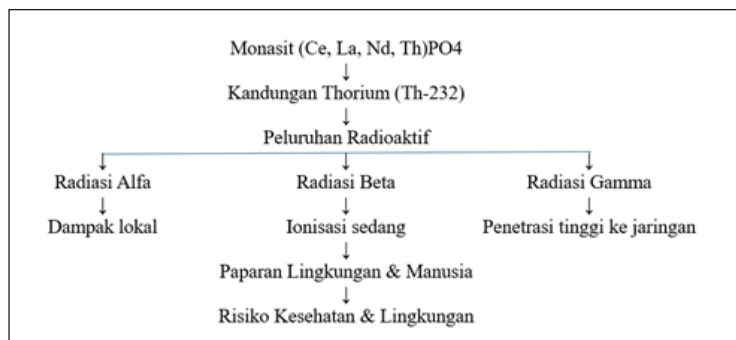


Diagram alir radiasi monasit

Monasit sebagai Ancaman

a. Risiko Kesehatan

Risiko kesehatan dari mineral monasit terutama berkaitan dengan kandungan unsur radioaktifnya, yaitu thorium (Th) dan uranium (U), yang mengalami peluruhan dan menghasilkan radiasi alfa, beta, dan gamma. Paparan terhadap radiasi ini dapat terjadi melalui tiga jalur utama, yaitu inhalasi (terhirup), ingesti (tertelan), dan paparan eksternal. Dari ketiga jalur tersebut, inhalasi merupakan yang paling berbahaya, terutama ketika partikel halus monasit atau debu hasil pengolahan masuk ke dalam saluran pernapasan. Partikel ini dapat mengendap di paru-paru dan memancarkan radiasi alfa secara terus-menerus, yang berpotensi merusak jaringan dan meningkatkan risiko kanker paru-paru. Selain itu, jika partikel radioaktif tertelan melalui air atau makanan yang terkontaminasi, radiasi dapat mempengaruhi organ dalam seperti hati dan ginjal.

Radiasi alfa, meskipun memiliki daya tembus rendah, sangat berbahaya ketika sumbernya berada di dalam tubuh karena mampu menyebabkan ionisasi tinggi pada sel, yang berujung pada kerusakan DNA. Sementara itu, radiasi beta dapat menembus jaringan kulit dan menyebabkan iritasi atau luka bakar ringan pada paparan tinggi, sedangkan radiasi gamma memiliki daya tembus paling besar sehingga dapat mempengaruhi organ tubuh dari luar dan meningkatkan risiko kanker secara umum akibat paparan jangka panjang. Selain efek langsung, paparan kronis dalam dosis rendah juga dapat menyebabkan

akumulasi kerusakan sel, gangguan sistem imun, serta meningkatkan kemungkinan mutasi genetik.

Kelompok yang paling berisiko adalah pekerja tambang, pekerja pengolahan mineral, serta masyarakat yang tinggal di sekitar lokasi penambangan tanpa perlindungan yang memadai. Risiko ini semakin meningkat

jika tidak ada pengendalian debu, ventilasi yang baik, serta penggunaan alat pelindung diri. Oleh karena itu, pengelolaan monasit memerlukan standar keselamatan radiasi yang ketat, termasuk pemantauan dosis radiasi, pengelolaan limbah radioaktif, serta edukasi kesehatan bagi pekerja dan masyarakat sekitar, guna meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia.

b. Dampak Lingkungan

Dampak lingkungan dari mineral monasit terutama berkaitan dengan proses penambangan, pengolahan, serta kandungan radioaktif yang dimilikinya. Dalam kegiatan penambangan, khususnya pada endapan aluvial di wilayah pesisir dan sungai, eksploitasi monasit dapat menyebabkan kerusakan ekosistem seperti abrasi pantai, perubahan morfologi lahan, serta hilangnya habitat alami flora dan fauna. Proses pengerukan dan pemisahan mineral berat juga berpotensi meningkatkan kekeruhan air, yang dapat mengganggu kehidupan organisme akuatik.

Selain itu, kandungan thorium dan uranium dalam monasit dapat menimbulkan pencemaran radioaktif jika limbah hasil pengolahan tidak dikelola dengan baik. Limbah ini dapat mencemari tanah dan air, sehingga berpotensi masuk ke dalam rantai makanan dan berdampak pada organisme hidup, termasuk manusia. Kontaminasi jangka panjang dapat menyebabkan penurunan kualitas tanah dan air serta gangguan keseimbangan ekosistem.

Debu hasil penambangan dan pengolahan monasit juga menjadi sumber pencemaran udara, terutama jika mengandung partikel radioaktif. Partikel ini dapat tersebar ke lingkungan sekitar dan mengendap di permukaan tanah atau perairan, sehingga memperluas area terdampak. Selain itu, akumulasi bahan radioaktif di lingkungan dapat menyebabkan peningkatan tingkat radiasi alami yang berpotensi membahayakan organisme dalam jangka panjang.

Oleh karena itu, pengelolaan monasit harus dilakukan secara hati-hati dengan menerapkan prinsip pertambangan

berkelanjutan, seperti reklamasi lahan pascatambang, pengolahan limbah radioaktif yang aman, serta pemantauan lingkungan secara berkala, guna meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem dan menjaga keseimbangan lingkungan.

c. Tantangan Pengelolaan Limbah

Pengolahan limbah monasit menghadapi berbagai tantangan kompleks yang berkaitan dengan aspek teknis, lingkungan, kesehatan, dan regulasi. Tantangan utama berasal dari kandungan unsur radioaktif seperti thorium (Th) dan uranium (U) yang tersisa dalam limbah setelah proses ekstraksi unsur tanah jarang (REE). Limbah ini tidak dapat dibuang sembarangan karena berpotensi mencemari tanah, air, dan udara serta menimbulkan risiko radiasi jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengelolaan khusus seperti penyimpanan aman (secure storage) dan isolasi jangka panjang, yang tentu membutuhkan biaya tinggi dan teknologi yang memadai.

Selain itu, tantangan teknis juga muncul dalam proses pemisahan REE dari monasit yang umumnya menggunakan bahan kimia kuat, sehingga menghasilkan limbah cair berbahaya yang harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang. Pengolahan limbah ini memerlukan instalasi khusus dan pengawasan ketat agar tidak terjadi kebocoran atau pencemaran lingkungan. Dari sisi ekonomi, tingginya biaya pengolahan dan pengelolaan limbah sering menjadi kendala dalam pengembangan industri monasit, terutama di negara berkembang.

Tantangan lainnya adalah aspek regulasi dan sosial. Pengelolaan limbah radioaktif diatur secara ketat oleh pemerintah dan lembaga internasional, sehingga perusahaan harus memenuhi standar keselamatan yang tinggi. Di sisi lain, persepsi masyarakat terhadap limbah radioaktif cenderung negatif, sehingga dapat menimbulkan penolakan sosial terhadap kegiatan penambangan dan pengolahan monasit.

Dengan demikian, pengolahan limbah monasit memerlukan pendekatan terpadu yang mencakup teknologi yang aman, kebijakan

yang ketat, serta edukasi masyarakat, agar risiko dapat diminimalkan dan pemanfaatan sumber daya tetap dapat berjalan secara berkelanjutan.

Monasit Sebagai Sumber Daya Strategis

Monasit merupakan salah satu mineral yang memiliki nilai tinggi sebagai sumber daya strategis karena kandungan utama di dalamnya berupa unsur tanah jarang (Rare Earth Elements / REE) dan thorium (Th). Unsur tanah jarang seperti cerium (Ce), lanthanum (La), dan neodymium (Nd) sangat dibutuhkan dalam berbagai industri modern, termasuk pembuatan magnet permanen, kendaraan listrik, turbin angin, serta perangkat elektronik seperti smartphone dan komputer. Permintaan global terhadap REE terus meningkat seiring perkembangan teknologi dan transisi menuju energi bersih, sehingga menjadikan monasit sebagai komoditas penting dalam rantai pasok industri global.

Selain itu, kandungan thorium dalam monasit memberikan potensi tambahan sebagai sumber energi nuklir alternatif. Thorium dianggap lebih melimpah dibanding uranium dan memiliki keunggulan dalam aspek keamanan pada beberapa desain reaktor nuklir generasi baru. Hal ini menjadikan monasit tidak hanya penting dari sisi industri teknologi, tetapi juga dalam konteks ketahanan energi masa depan.

Dari sisi ekonomi, monasit memiliki nilai strategis karena dapat meningkatkan nilai tambah sumber daya mineral, terutama jika diolah hingga tahap hilirisasi.

Negara yang memiliki cadangan monasit, seperti Indonesia, berpeluang besar untuk mengembangkan industri berbasis REE dan memperkuat posisi dalam pasar global. Namun, pemanfaatan ini tetap harus diimbangi dengan

pengelolaan yang baik terhadap kandungan radioaktifnya agar tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan dan kesehatan. Dengan demikian, monasit dapat dipandang sebagai sumber daya strategis yang memiliki potensi besar untuk mendukung perkembangan teknologi, ekonomi, dan energi di masa depan.

Sebaran Monasit di Indonesia

Sebaran mineral monasit di Indonesia umumnya berkaitan erat dengan endapan mineral berat, pada endapan aluvial atau *placer* dan aktivitas magmatik granitik. Monasit sering ditemukan sebagai mineral ikutan dalam penambangan timah. Sebaran monasit di Indonesia, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

- Sebaran tidak merata, dengan konsentrasi utama berada di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung sebagai wilayah dengan potensi monasit terbesar di Indonesia
- Monasit umumnya ditemukan sebagai mineral ikutan (*by-product*), terutama dalam penambangan timah, bukan sebagai komoditas utama
- Lingkungan pembentukan didominasi endapan *placer* (pantai, sungai, aluvial), yang berasal dari pelapukan batuan granitik
- Wilayah lain seperti Kalimantan dan Sumatera memiliki potensi tambahan, tetapi belum dimanfaatkan secara optimal
- Beberapa daerah seperti Sulawesi dan Papua masih berada pada tahap indikasi awal, sehingga memerlukan penelitian dan eksplorasi lebih lanjut
- Sebaran monasit menunjukkan keterkaitan kuat dengan kondisi geologi, khususnya keberadaan batuan granit dan proses sedimentasi
- Secara keseluruhan, Indonesia memiliki potensi besar sebagai sumber monasit, namun pemanfaatannya masih belum maksimal

Daerah Potensi Monasit di Indonesia

Provinsi	Lokasi Utama	Karakteristik Endapan	Keterangan Potensi
Kepulauan Bangka Belitung	Pulau Bangka, Pulau Belitung	Endapan placer (pantai, aluvial)	Potensi terbesar, mineral ikutan timah
Kalimantan Barat	Daerah aluvial dan sungai	Endapan placer dan sedimen	Potensi sedang, belum optimal
Kalimantan Tengah	Daerah sungai dan dataran aluvial	Endapan aluvial	Potensi terbatas
Sumatera Selatan	Sekitar aliran sungai dan sedimen	Endapan aluvial	Potensi kecil
Kepulauan Riau	Wilayah pesisir	Endapan pantai (placer)	Potensi kecil-sedang
Sulawesi Tengah	Area batuan metamorf	Endapan sekunder	Masih tahap indikasi
Papua	Wilayah tertentu dengan batuan metamorf	Endapan berat lokal	Potensi belum berkembang

Analisis: Ancaman vs Peluang

Dari penjelasan monasit sebelumnya, bisa disimpulkan perbandingan aspek dari segi ancaman dan peluang pengelolaan mineral monasit di Indonesia. Monasit bukan semata-mata ancaman, tetapi juga peluang besar, tergantung pada bagaimana manusia mengelolanya.

Strategi Pengelolaan yang Berkelanjutan

Strategi pengelolaan monasit mencakup tiga tahapan utama, yaitu pemisahan fisik awal, dekomposisi kimia, serta pemisahan unsur logam tanah jarang dan pengendalian radioaktif. Pelaksanaan yang tepat memastikan nilai ekonomi tinggi sekaligus keamanan lingkungan.

Peluang dan Tantangan Sumber Daya Monasit

Aspek	Peluang	Ancaman
Ekonomi	Nilai tinggi REE, hilirisasi	Fluktuasi pasar global
Lingkungan	Potensi pemanfaatan berkelanjutan	Kerusakan ekosistem
Teknologi	Dorongan industri maju	Kebutuhan teknologi mahal
Regulasi	Penguatan tata kelola	Kompleksitas pengolahan
Kesehatan	—	Radioaktivitas (Thorium, Uranium)
Geopolitik	Kemandirian sumber daya	Ketergantungan pasar luar
Aspek	Ancaman	Peluang
Lingkungan	Limbah radioaktif	Teknologi pengolahan ramah lingkungan
Kesehatan	Paparan radiasi	Standar keselamatan kerja
Ekonomi	Biaya tinggi pengelolaan	Nilai REE dan thorium
Energi	Risiko nuklir	Energi bersih berbasis thorium

Strategi Pengelolaan yang Berkelanjutan

No	Aspek Strategi	Strategi Utama	Implementasi Teknis	Tujuan	Tantangan
1	Teknologi Ramah Lingkungan	Green processing	Hidrometalurgi terkendali, solvent extraction, closed-loop system	Mengurangi limbah & pencemaran	Biaya teknologi tinggi
2	Manajemen Radioaktivitas	Pengelolaan Thorium & Uranium	Penyimpanan tailing berlapis, monitoring radiasi, solidifikasi limbah	Melindungi kesehatan & lingkungan	Regulasi ketat, teknologi khusus
3	Pengelolaan Lingkungan	Reklamasi & restorasi	Rehabilitasi lahan, revegetasi, pengendalian erosi	Memulihkan ekosistem	Waktu pemulihan lama
4	Hilirisasi Industri	Pengolahan lanjutan REE	Pembangunan refinery, industri magnet & baterai	Meningkatkan nilai tambah	Infrastruktur & investasi besar
5	Riset & Inovasi	Pengembangan teknologi	Riset ekstraksi REE, pemisahan Thorium, kolaborasi akademik	Efisiensi & kemandirian teknologi	Keterbatasan SDM & dana
6	Regulasi & Tata Kelola	Pengawasan ketat	AMDAL, izin lingkungan, pengawasan ekspor	Pengelolaan berkelanjutan	Penegakan hukum
7	Sosial & Komunitas	Keterlibatan masyarakat	CSR, edukasi, tenaga kerja lokal	Mengurangi konflik sosial	Penerimaan masyarakat
8	Ekonomi Sirkular	Pemanfaatan limbah	Recovery REE dari tailing, daur ulang e-waste	Efisiensi sumber daya	Teknologi pemrosesan
9	Supply Chain	Integrasi industri	Integrasi tambang–olah–produk akhir	Efisiensi rantai nilai	Koordinasi lintas sektor
10	Keberlanjutan Global	Standar ESG	Sertifikasi lingkungan, standar internasional	Daya saing global	Adaptasi standar

Kesimpulan

Monasit (Monazite) merupakan sumber daya mineral strategis yang memiliki nilai tinggi karena kandungan rare earth elements (REE), namun juga memiliki tantangan besar terkait radioaktivitas dan dampak lingkungan.

Sebaran monasit di Indonesia terkonsentrasi pada wilayah dengan aktivitas granitik dan sistem endapan placer, seperti Bangka Belitung, Kalimantan, dan Sulawesi, sementara wilayah lain seperti Jawa dan NTT memiliki potensi yang masih perlu dikaji lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki posisi penting sebagai salah satu negara dengan potensi sumber daya REE di dunia.

Dari sisi peluang, monasit dapat menjadi motor penggerak industrialisasi mineral strategis, pengembangan teknologi tinggi

(baterai, magnet, energi), serta peningkatan nilai tambah melalui hilirisasi. Namun, pemanfaatannya tidak lepas dari ancaman, terutama radioaktivitas (Thorium & Uranium), kerusakan lingkungan akibat penambangan, keterbatasan teknologi dan regulasi, serta risiko penambangan ilegal dan fluktuasi pasar global. Oleh karena itu, pengelolaan monasit harus dilakukan secara berkelanjutan, dengan pendekatan teknologi ramah lingkungan, manajemen limbah radioaktif, reklamasi dan perlindungan lingkungan, penguatan regulasi dan tata kelola, serta pengembangan industri hilir berbasis REE.

Penulis:
Mahasiswi Teknologi Geologi,
Angkatan Tahun 2025

Swabakar Batubara dan Kebakaran Alami Tanpa Api Penyulut

Oleh: Darwisa Aulia Mandica

Pernahkah teman-teman membayangkan bagaimana batubara bisa terbakar tanpa adanya percikan api ataupun sumber panas dari luar? Dan bagaimana mungkin suatu batubara yang hanya disimpan atau ditumpuk dalam jumlah besar tiba-tiba mengeluarkan asap bahkan terbakar dengan sendirinya?

Nah, fenomena inilah yang mungkin terdengar tidak masuk akal, namun dalam dunia pertambangan hal tersebut merupakan kejadian yang nyata dan dikenal sebagai swabakar atau *spontaneous combustion*.

Swabakar merupakan proses dimana pembakaran spontan terjadi akibat reaksi kimia antara batubara dengan oksigen di udara. Reaksi ini menghasilkan panas secara perlahan, dan jika panas tersebut terus terakumulasi tanpa dapat dilepaskan ke lingkungan, suhu batubara akan meningkat hingga mencapai titik penyalan. Kondisi inilah yang menyebabkan batubara dapat terbakar tanpa adanya percikan api.

Sifat Kimia dan Fisika Batubara

Batubara merupakan sumber daya alam yang terbentuk melalui proses geologi yang sangat panjang, melibatkan perubahan kimia dan fisika material organik selama puluhan hingga ratusan juta tahun. Batubara berasal



Lapisan batubara yang terbakar di bawah tanah. Lokasi di Montana bagian timur, batubara telah terbakar selama kurun waktu ribuan tahun. (Foto CM Thermal and Fire, dalam Larson, 2022, <https://montanafreepress.org>)

dari sisa-sisa tumbuhan yang terendapkan dan kemudian mengalami proses perubahan akibat tekanan dan temperatur di dalam bumi dalam jangka waktu yang lama (Anam, 2008). Pada tahap awal, endapan tumbuhan tersebut berubah menjadi gambut, kemudian mengalami peningkatan tekanan dan suhu sehingga berkembang menjadi batubara muda (lignit), selanjutnya menjadi sub-bituminus, hingga akhirnya membentuk batubara bituminus yang lebih keras, berwarna lebih hitam, dan memiliki kandungan karbon lebih tinggi. Perubahan bertahap ini mempengaruhi sifat kimia dan fisika batubara, seperti kandungan unsur penyusun, kadar air, struktur pori, serta tingkat reaktivitasnya terhadap oksigen, yang pada akhirnya menentukan perilaku batubara termasuk kerentanannya terhadap proses oksidasi dan pembakaran spontan.

Batubara memiliki karakteristik kimia dan fisika yang berperan penting dalam menentukan potensi terjadinya fenomena swabakar (*spontaneous combustion*). Secara kimia, batubara tersusun atas unsur utama seperti karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur, serta mengandung berbagai mineral, salah satunya pirit (FeS_2). Selain itu, batubara juga mengandung air dan abu yang turut mempengaruhi sifat pembakarannya.

Salah satu faktor yang paling menentukan kerentanan batubara terhadap swabakar adalah peringkat atau tingkat kematangan batubara. Batubara dengan peringkat rendah, seperti lignit dan sub-bituminus, umumnya memiliki kadar air yang tinggi dan mengandung gugus fungsi oksigen seperti karboksil dan hidroksil yang bersifat reaktif terhadap oksigen di udara. Akibatnya, batubara jenis ini lebih mudah mengalami proses oksidasi bahkan pada suhu lingkungan. Semakin rendah peringkat batubara, semakin tinggi pula reaktivitasnya terhadap oksigen sehingga risiko terjadinya swabakar menjadi lebih besar.

Selain itu, keberadaan mineral tertentu juga dapat mempengaruhi proses pemanasan pada batubara. Mineral pirit (FeS_2), misalnya, dapat bereaksi dengan oksigen dan uap air melalui reaksi oksidasi yang bersifat

eksotermis, yaitu menghasilkan panas. Panas yang dihasilkan dari reaksi ini dapat meningkatkan suhu di dalam timbunan batubara dan mempercepat terjadinya proses pemanasan sendiri (*self-heating*).

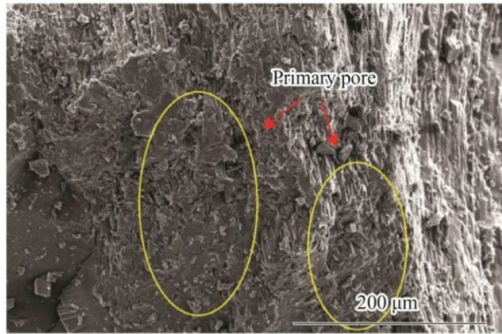
Dari sisi fisika, batubara memiliki struktur pori yang kompleks, mulai dari makropori hingga mikropori, sehingga luas permukaan internalnya menjadi sangat besar. Struktur ini memungkinkan terjadinya kontak yang lebih luas antara batubara dengan oksigen di udara sehingga mempercepat proses oksidasi. Selain itu, batubara memiliki konduktivitas termal yang rendah, yang berarti batubara tidak mudah menghantarkan panas. Akibatnya, panas yang dihasilkan dari reaksi oksidasi cenderung terperangkap di dalam tumpukan batubara dan sulit dilepaskan ke lingkungan. Jika panas tersebut terus terakumulasi, kondisi ini dapat menciptakan lingkungan yang mendukung terjadinya pemanasan spontan dan berpotensi menyebabkan kebakaran batubara.

Mekanisme Swabakar: Terbakar Tanpa Api Penyulut

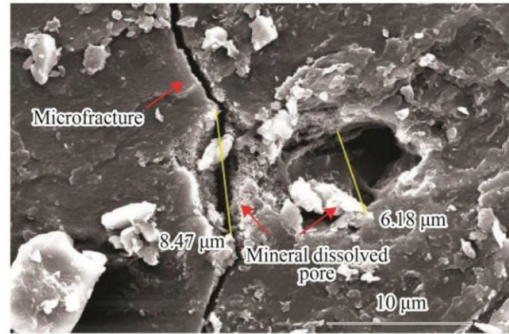
Mekanisme pembakaran spontan batubara dalam suatu timbunan (*coal stockpile*), diawali ketika batubara terpapar udara sehingga oksigen dapat masuk ke dalam pori-pori batubara. Oksigen tersebut kemudian bereaksi dengan material organik batubara melalui proses oksidasi suhu rendah. Reaksi oksidasi ini bersifat eksotermis, yaitu menghasilkan panas sebagai produk reaksi.

Pada tahap awal, panas yang dihasilkan masih relatif kecil sehingga tidak menimbulkan perubahan yang signifikan. Namun, ketika batubara disimpan dalam jumlah besar atau dalam bentuk timbunan, panas yang dihasilkan dari proses oksidasi tersebut tidak dapat dilepaskan secara efektif ke lingkungan melalui konduksi, konveksi, maupun radiasi. Akibatnya, panas akan terakumulasi di dalam tumpukan batubara.

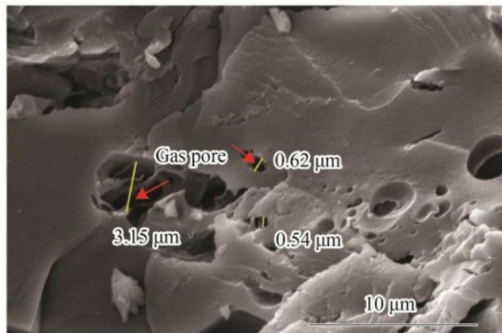
Akumulasi panas ini menyebabkan suhu batubara meningkat secara bertahap. Peningkatan suhu tersebut kemudian mempercepat reaksi oksidasi yang terjadi di



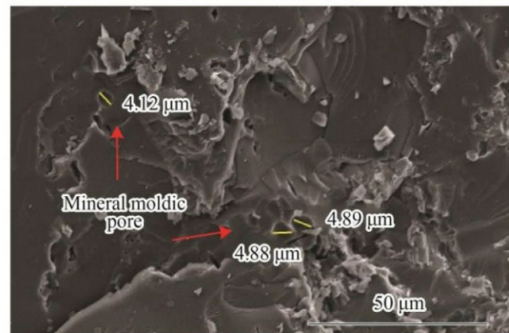
a. FKQ



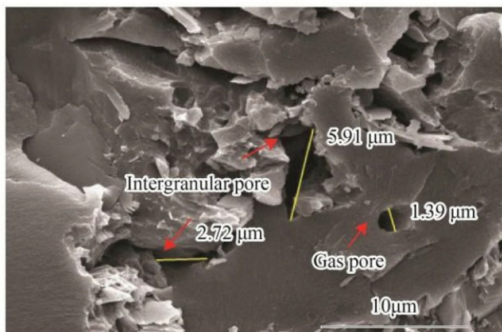
b. FKQ



c. BD



d. SJZ



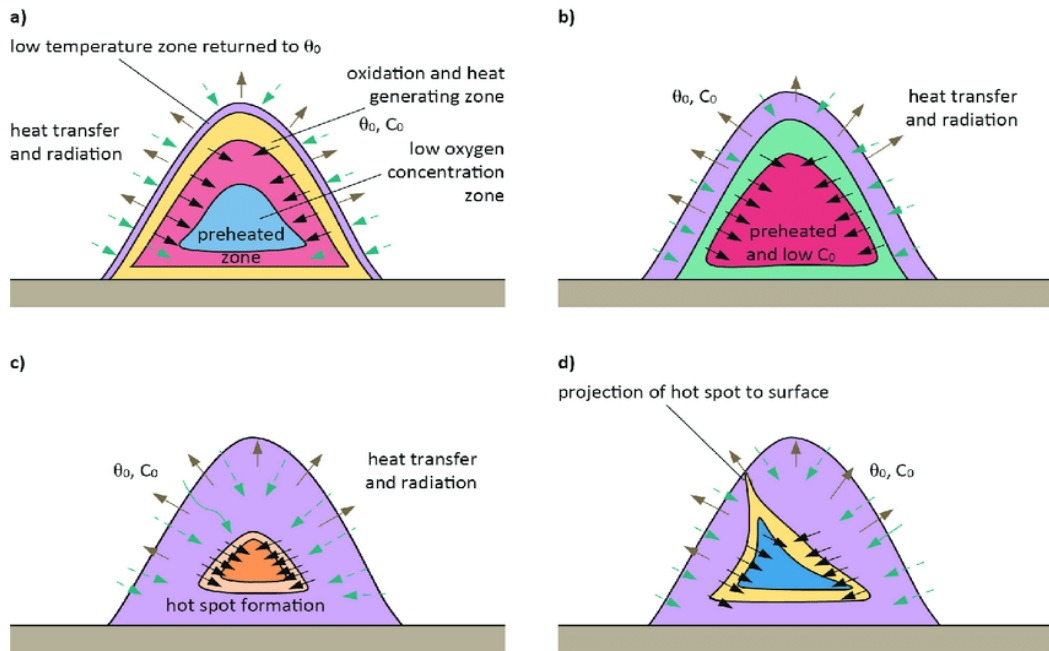
e. SH02

Foto SEM pori-pori dalam sampel batubara. Gambar menunjukkan struktur mikro batubara yang diamati menggunakan mikroskop elektron (SEM). Terlihat adanya pori-pori dan rekahan pada matriks batubara yang menjadi jalur masuknya oksigen ke dalam struktur batubara. Pori-pori tersebut memiliki ukuran yang bervariasi, mulai dari mikropori hingga makropori, yang sangat berperan dalam proses adsorpsi gas serta reaksi oksidasi pada batubara (Pan, dkk., 2019).

dalam batubara sehingga menghasilkan panas yang lebih besar. Proses ini berlangsung secara berulang dan saling memperkuat hingga suhu batubara mencapai titik penyalan (*ignition temperature*). Pada kondisi tersebut, batubara dapat terbakar dengan sendirinya tanpa adanya sumber api eksternal. Fenomena inilah yang dikenal sebagai pembakaran spontan atau *spontaneous combustion* pada batubara.

Faktor Terjadinya Pembakaran Spontan Batubara

Setelah memahami mekanisme terjadinya swabakar pada batubara, perlu diketahui bahwa proses ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang berasal dari sifat alami batubara maupun kondisi lingkungan tempat batubara disimpan atau diangkut. Dari sisi intrinsik, jenis dan peringkat batubara sangat menentukan kerentanannya terhadap pembakaran spontan. Batubara berperingkat



Skema yang menunjukkan mekanisme pembakaran spontan (Spontaneous Combustion) sejumlah besar stok (tumpukan) batubara, (a), (b) dan (c): Proses pembentukan titik panas dengan akumulasi panas dan penyusutan zona oksidasi dan zona pemanasan awal, (d): Pertumbuhan proyeksi titik panas menuju permukaan tumpukan melalui jalur permeabilitas tinggi (Sasaki dan Sugai, 2014)



Tumpukan (*stock pile*) batubara di Desa Sungaigelas, Kabupaten Muarojambi, Jambi terbakar (Foto Azhari, 2024, dalam <https://www.jambione.com/news>)

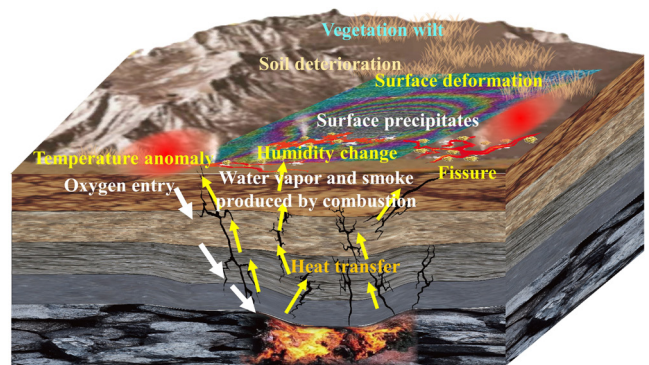
rendah seperti lignit dan sub-bituminus umumnya lebih mudah mengalami oksidasi karena memiliki kadar air, oksigen, dan zat terbang (*volatile matter*) yang tinggi serta struktur yang lebih berpori. Selain itu, kandungan mineral seperti pirit (FeS_2) juga dapat meningkatkan potensi swabakar karena proses oksidasinya menghasilkan panas.

Ukuran partikel batubara juga berpengaruh terhadap laju oksidasi. Batubara dengan ukuran butir lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar sehingga lebih mudah bereaksi dengan oksigen di udara. Akibatnya, proses pemanasan sendiri dapat berlangsung lebih cepat.

Di samping itu, faktor ekstrinsik seperti lama penimbunan, bentuk dan tinggi tumpukan, serta kondisi lingkungan juga berperan penting. Tumpukan batubara yang disimpan terlalu lama atau terlalu tinggi dapat memerangkap panas di bagian dalam, sehingga meningkatkan risiko kebakaran spontan. Kondisi suhu lingkungan yang tinggi dan sirkulasi udara yang membawa oksigen secara terus-menerus juga dapat mempercepat proses oksidasi. Oleh karena itu, pengelolaan penyimpanan dan transportasi batubara yang baik menjadi langkah penting untuk meminimalkan risiko swabakar.

Dampak Lingkungan dan Swabakar Dalam Pengangkutan

Kebakaran batubara bawah tanah dapat menimbulkan berbagai dampak lingkungan yang serius. Proses pembakaran yang terjadi di dalam lapisan batubara menghasilkan panas yang kemudian merambat ke batuan di sekitarnya melalui perpindahan panas. Panas tersebut dapat memicu munculnya retakan pada permukaan tanah, deformasi permukaan, hingga penurunan kualitas tanah. Melalui celah dan rekahan tersebut, oksigen dari udara dapat masuk ke dalam lapisan batubara sehingga mempercepat proses pembakaran yang sedang berlangsung. Pada saat yang sama, asap, uap air, serta gas hasil pembakaran dapat keluar ke permukaan dan menyebabkan peningkatan suhu di area sekitar, perubahan kelembapan tanah, serta kerusakan vegetasi di atasnya.



Dampak lingkungan akibat terbakarnya batubara bawah tanah (Sumber: Yuan dkk., 2023)



Kapal tongkang pengangkut batubara terbakar di perairan Lamongan. (Foto Ahmad, 2025, dalam <https://suaraindonesia.co.id/news/>).

Fenomena ini menunjukkan bahwa batubara memiliki potensi mengalami pemanasan sendiri (*self-heating*) yang dalam kondisi tertentu dapat berkembang menjadi kebakaran. Prinsip yang sama juga menjadi salah satu risiko dalam proses pengangkutan batubara. Ketika batubara diangkut dalam jumlah besar, misalnya di dalam ruang muatan kapal, truk, atau kereta, proses oksidasi tetap dapat berlangsung dan menghasilkan panas. Apabila panas tersebut terakumulasi dan tidak dapat dilepaskan secara efektif ke lingkungan, suhu batubara akan meningkat secara bertahap dan berpotensi memicu pembakaran spontan. Oleh karena itu, pengelolaan dan pengawasan selama proses transportasi menjadi sangat penting untuk meminimalkan risiko kebakaran serta menjaga keselamatan dan lingkungan.

Contoh Kasus Kebakaran Batubara Alami

Untuk contoh kasus pertama kebakaran batubara alami terjadi di wilayah Xinjiang, Tiongkok, tepatnya di tambang Liuhuanggou dekat Kota Urumqi. Kebakaran tersebut dilaporkan mulai terjadi sejak tahun 1874 dan terus berlangsung selama lebih dari satu abad hingga akhirnya berhasil dipadamkan pada tahun 2004. Selama kebakaran berlangsung, diperkirakan sekitar 1,8 juta ton batubara terbakar setiap tahun dan menghasilkan sekitar 100.000 ton gas berbahaya serta 40.000 ton abu yang mencemari lingkungan. Besarnya panas yang dihasilkan bahkan membuat area tambang memerlukan waktu puluhan tahun untuk kembali mendingin sebelum dapat digunakan kembali untuk kegiatan penambangan. Peristiwa ini menunjukkan bahwa kebakaran batubara bawah tanah dapat berlangsung sangat lama dan memberikan dampak lingkungan yang besar.

Selain di China, kebakaran batubara alami juga terjadi di Amerika Serikat yaitu di kota Centralia, Pennsylvania. Kebakaran ini dimulai pada tahun 1962 ketika api dari pembakaran sampah merambat ke lapisan



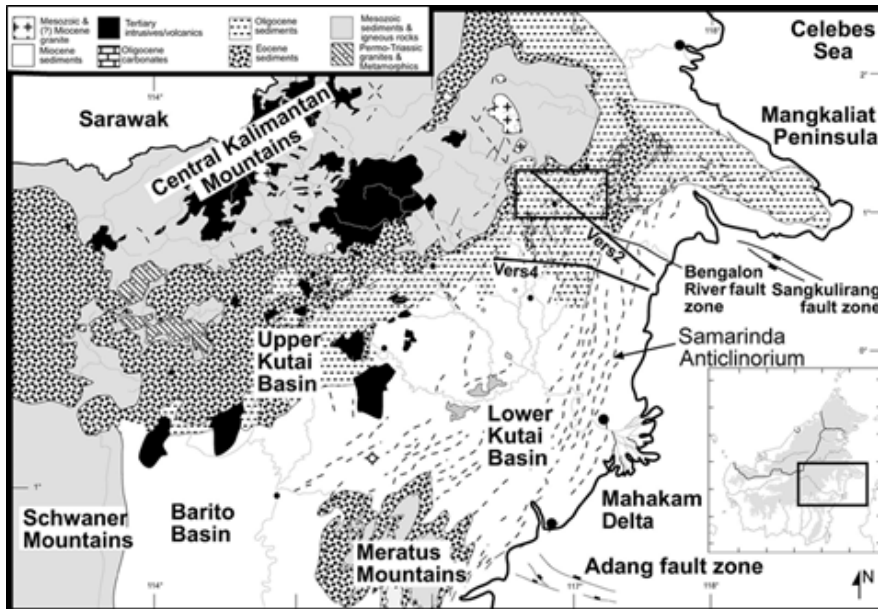
Kebakaran batubara bawah tanah di Centralia, Amerika Serikat, telah berlangsung sejak tahun 1962 hingga saat ini (Sumber: Roozée, 2010).

batubara di bawah tanah. Setelah batubara terbakar, api terus menyebar melalui rekahan batuan dan lapisan batubara di bawah permukaan. Kebakaran ini menghasilkan panas, asap, dan gas beracun seperti karbon monoksida yang keluar melalui retakan tanah. Selain menyebabkan kerusakan lingkungan, kebakaran ini juga memicu penurunan tanah (*subsidence*) dan memaksa sebagian besar penduduk kota untuk meninggalkan wilayah tersebut. Hingga saat ini, kebakaran di Centralia masih terus berlangsung karena api di lapisan batubara bawah tanah sangat sulit dipadamkan.

Contoh kasus di Indonesia yaitu di daerah Kalimantan Timur di wilayah Cekungan Kutai, Kalimantan Timur. Kawasan ini merupakan salah satu daerah penghasil batubara terbesar di Indonesia dengan banyak lapisan batubara yang tersingkap di permukaan akibat proses geologi maupun aktivitas penambangan. Kondisi tersebut membuat batubara mudah terpapar oksigen sehingga memicu proses oksidasi yang menghasilkan panas. Dalam beberapa kasus, panas yang terakumulasi dapat menyebabkan pembakaran spontan pada lapisan batubara dangkal atau sisa batubara di area tambang. Fenomena ini menunjukkan bahwa kebakaran batubara



Kebakaran batubara bawah tanah di Xinjiang, Tiongkok, berlangsung selama lebih dari satu abad akibat pembakaran spontan pada lapisan batubara (Lorenz, 2014)



Wilayah Cekungan Kutai di Kalimantan Timur yang merupakan salah satu daerah dengan endapan batubara besar di Indonesia dan berpotensi mengalami kebakaran lapisan batubara bawah tanah (Sumber: Chambers dkk., 2004).



Kebakaran batubara di Desa Bukit Mulia, Kecamatan Kintap, Kabupaten Tanah Laut (Arsyad, 2023, dalam <https://lenterakalimantan.com>)

bukan hanya terjadi di luar negeri seperti di Tiongkok atau di Centralia, tetapi juga berpotensi terjadi di Indonesia apabila kondisi geologi dan lingkungan mendukung terjadinya proses swabakar.

Penulis: Mahasiswa Teknologi Geologi, Angkatan 2025.

Dampak Pembakaran Batubara Terhadap Lingkungan Skala Industri Hingga Domestik



Polutan hasil pembakaran batubara. Kadar moisture dalam batubara yang tinggi menghasilkan kepulan uap dan asap saat pembakaran (sumber: <https://greenchem.co.id/id/news>)

Oleh: Darwisa Aulia Mandica

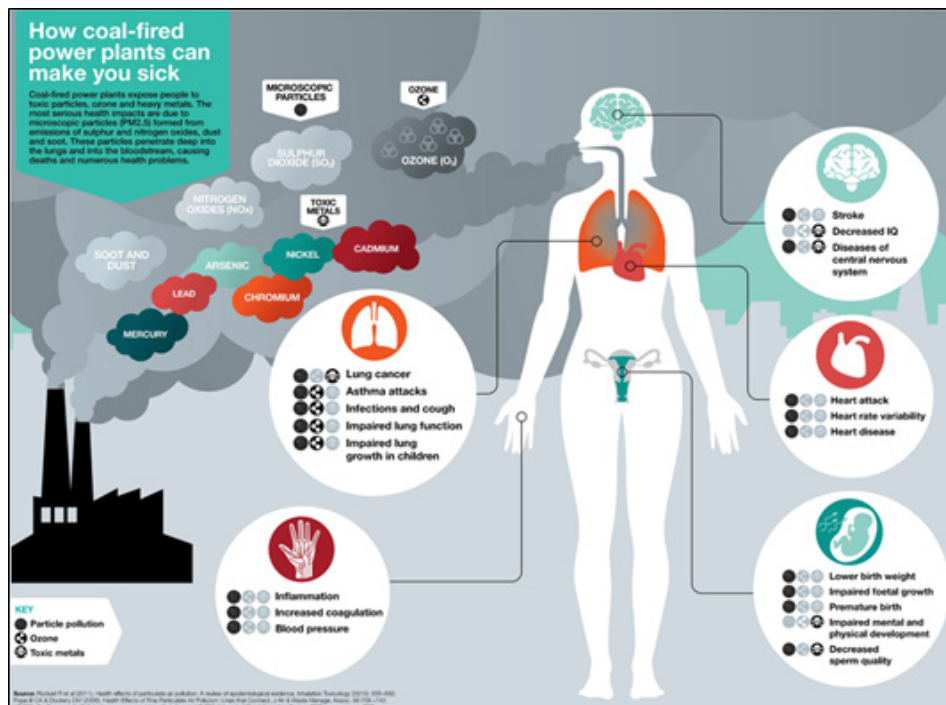
Dampak Lingkungan Akibat Pembakaran Batubara

Batubara merupakan salah satu sumber energi fosil yang hingga saat ini masih banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi, terutama pada sektor industri dan pembangkit listrik. Ketersediaannya yang cukup melimpah serta nilai kalor yang tinggi menjadikan batubara sebagai sumber energi yang relatif mudah dimanfaatkan. Namun, di balik pemanfaatannya tersebut, proses pembakaran batubara juga dapat menimbulkan berbagai dampak terhadap lingkungan yang perlu diperhatikan.

Secara umum, pembakaran batubara menghasilkan berbagai emisi gas yang dapat berkontribusi terhadap pencemaran udara dan perubahan iklim. Salah satu emisi utama

yang dihasilkan adalah karbon dioksida (CO_2), yang termasuk ke dalam gas rumah kaca. Peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer dapat memperkuat efek rumah kaca dan berperan dalam peningkatan suhu global. Selain itu, pembakaran batubara juga menghasilkan gas lain seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x). Kedua gas ini dapat bereaksi di atmosfer dan berpotensi membentuk hujan asam yang dapat memengaruhi kualitas tanah, merusak vegetasi, serta mengganggu keseimbangan ekosistem perairan.

Selain emisi gas, pembakaran batubara juga menghasilkan partikulat serta limbah padat berupa abu batubara, seperti *fly ash* dan *bottom ash*. Partikulat yang dilepaskan ke udara dapat menurunkan kualitas udara dan berpengaruh terhadap kesehatan manusia, khususnya pada sistem pernapasan. Sementara



Dampak polutan dari pembakaran batubara terhadap organ tubuh manusia (Sumber: Tasev dkk., 2025)

itu, abu batubara sering mengandung unsur logam berat yang berpotensi mencemari tanah dan air apabila tidak dikelola dengan baik.

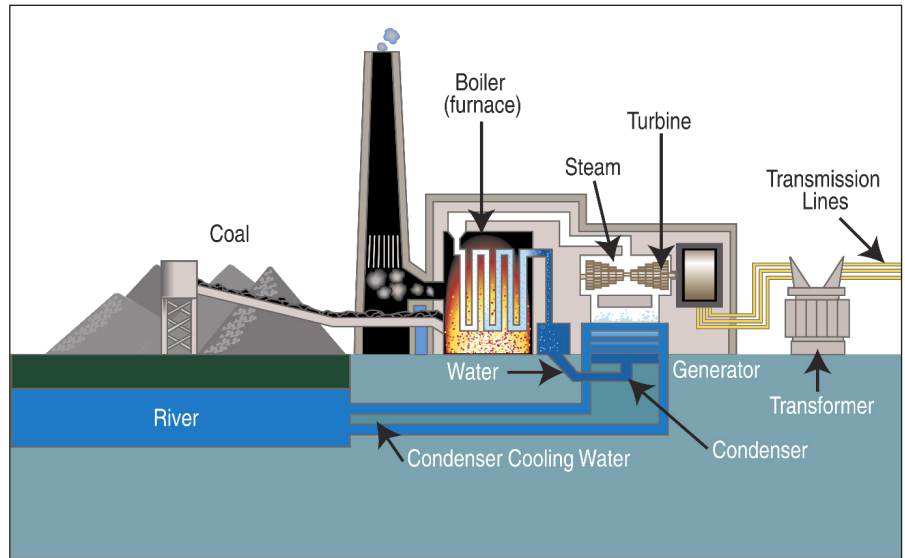
Polutan yang dihasilkan dari pembakaran batubara juga dapat berdampak langsung pada kesehatan manusia. Gas, partikulat halus, serta logam berat yang dilepaskan ke udara dapat masuk ke dalam tubuh melalui sistem pernapasan dan kemudian memengaruhi berbagai organ. Dampak yang ditimbulkan tidak hanya terbatas pada paru-paru, tetapi juga dapat memengaruhi sistem saraf, jantung, hingga sistem reproduksi.

Selain itu, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa paparan unsur dan senyawa yang berasal dari batubara dapat memicu berbagai gangguan kesehatan tertentu. Paparan arsenik dapat menyebabkan arseniasi, flour memicu fluorosis, dan seleniu, menimbulkan selenosis. Emisis merkuri dari pembakaran batubara juga berpotensi menyebabkan keracunan yang berdampak pada sistem saraf. Sementara itu, paparan partikulat dan debu mineral seperti kuarsa dapat meningkatkan risiko penyakit paru-paru, termasuk pneumokoniosis pada pekerja tambang serta kanker paru-paru.

**Contoh gangguan kesehatan di Tiongkok dampak pembakaran batubara
(Finkelman dan Tian, 2017)**

Health issue	Cause	Estimated number of people who have been afflicted
Arseniasis	Exposure to arsenic	Tens of thousands
Fluorosis	Exposure to fluorine	More than 10 million
Selenosis	Exposure to selenium	Several hundred
Mercury poisoning	Exposure to mercury	Unknown
Coal workers' pneumoconiosis	Inhalation of pyrite	Several hundred thousand coal miners
Lung cancer	Inhalation of quartz	Several thousand
Respiratory problems	Exposure to particulates	Hundreds of millions
Various issues	Exposure to organics	Probably millions
Iodine deficiency disorder prevention	Exposure to iodine mobilized by coal combustion	Thousands

Diagram proses pembangkitan listrik pada PLTU berbahan bakar batubara (sumber: Tennessee Valley Authority melalui Wikimedia Commons).

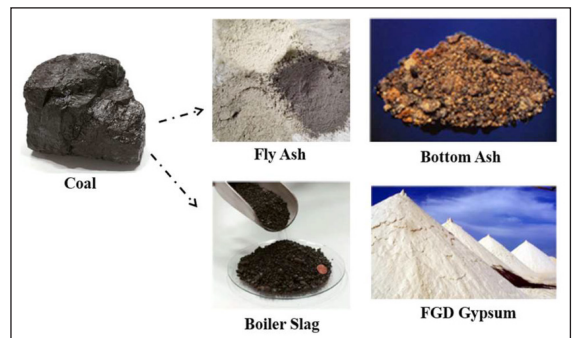


Aktivitas Pembakaran Batubara Untuk PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar utama. Batubara dipilih karena ketersediaannya cukup melimpah dan mampu menghasilkan energi dalam jumlah besar secara stabil. Hal ini membuat PLTU menjadi salah satu sumber utama penyedia listrik, terutama untuk kebutuhan skala besar.

Uap bertekanan tinggi kemudian dialirkan menuju turbin uap. Ketika uap melewati turbin, turbin akan berputar dan putaran tersebut digunakan untuk menggerakkan generator, menghasilkan energi listrik. Setelah melewati turbin, uap akan didinginkan kembali di dalam kondensor hingga berubah menjadi air, kemudian dialirkan kembali ke *boiler* sehingga proses ini berlangsung dalam siklus yang berulang.

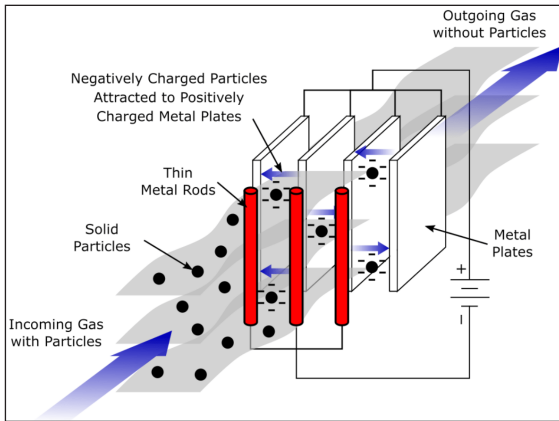
Selain menghasilkan energi listrik, proses pembakaran batubara juga menghasilkan limbah padat berupa abu batubara. Limbah ini umumnya terbagi menjadi dua jenis, yaitu *fly ash* dan *bottom ash*. *Fly ash* merupakan abu halus yang terbawa bersama gas hasil pembakaran dan biasanya ditangkap menggunakan alat pengendali emisi sebelum dilepaskan ke atmosfer. Sementara itu, *bottom*



Jenis-jenis residu pembakaran batubara (coal combustion residuals) seperti fly ash dan bottom ash yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara pada pembangkit listrik. (Sumber: Deonarine dkk., 2023, Environmental Science & Technology).

ash adalah abu yang tertinggal di bagian bawah ruang pembakaran. Kedua jenis limbah ini dapat mengandung unsur logam berat sehingga perlu dikelola dengan baik agar tidak mencemari lingkungan di sekitarnya.

Selain limbah padat, operasional PLTU juga membutuhkan air dalam jumlah besar, terutama untuk proses pendinginan pada kondensor. Air ini biasanya diambil dari sumber air di sekitar pembangkit, seperti sungai atau laut, kemudian dikembalikan lagi setelah digunakan. Jika tidak dikelola dengan baik, perubahan suhu air yang dibuang kembali



Skema kerja electrostatic precipitator (ESP) yang digunakan pada pembangkit listrik untuk menangkap partikel debu dari gas hasil pembakaran sebelum dilepaskan ke atmosfer. (Sumber: <https://savree.com>)



Briket batubara yang digunakan sebagai bahan bakar pada tungku dapur rumah tangga. (Sumber: Finkelman, dan Tian, 2017, dalam *The Health Impacts of Coal Use in China*).

ke lingkungan dapat memengaruhi kondisi ekosistem perairan.

Untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan, berbagai teknologi pengendalian juga diterapkan pada PLTU. Teknologi seperti *electrostatic precipitator* digunakan untuk menangkap partikel debu, sementara pengelolaan limbah abu dilakukan melalui proses penyimpanan atau pemanfaatan kembali, misalnya sebagai bahan campuran dalam industri konstruksi. Upaya-upaya tersebut dilakukan agar operasional PLTU tetap dapat memenuhi kebutuhan energi sekaligus meminimalkan dampaknya terhadap lingkungan.

Pembakaran Batubara untuk Tungku Dapur dan Pemanas Ruangan

Selain digunakan dalam industri dan pembangkit listrik, seperti di Tiongkok batubara juga dimanfaatkan dalam skala rumah tangga. Di beberapa daerah, batubara digunakan sebagai bahan bakar untuk tungku dapur maupun pemanas ruangan. Penggunaan ini umumnya ditemukan di wilayah yang memiliki keterbatasan akses terhadap sumber energi lain, atau di daerah beriklim dingin yang membutuhkan sumber panas tambahan.

Batubara biasanya dibakar secara langsung di dalam tungku untuk menghasilkan panas yang kemudian dimanfaatkan untuk memasak atau menghangatkan ruangan. Cara ini tergolong sederhana dan cukup efektif dalam menghasilkan panas. Namun, pembakaran batubara di lingkungan rumah tangga umumnya dilakukan tanpa teknologi pengendalian emisi seperti yang diterapkan pada pembangkit listrik.

Kondisi tersebut menyebabkan asap dan berbagai zat pencemar dapat langsung dilepaskan ke udara. Pembakaran batubara dapat menghasilkan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO) serta partikulat halus yang dapat menurunkan kualitas udara di dalam ruangan. Jika ventilasi rumah kurang memadai, polutan tersebut dapat terakumulasi dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, terutama pada sistem pernapasan.

Selain memengaruhi kesehatan penghuni rumah, penggunaan batubara dalam skala domestik juga dapat berkontribusi terhadap pencemaran udara di lingkungan sekitar. Oleh karena itu, ketersediaan ventilasi yang baik serta pemanfaatan sumber energi yang lebih bersih menjadi langkah penting untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan dari pembakaran batubara di lingkungan rumah tangga.

Contoh kasus

Pembakaran batubara tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga dapat melepaskan berbagai unsur beracun yang berdampak langsung pada kesehatan manusia. Di beberapa wilayah di China, batubara yang digunakan sebagai sumber energi diketahui mengandung unsur berbahaya seperti arsenik dan fluor. Ketika batubara dibakar, unsur-unsur tersebut dapat terlepas ke lingkungan dan dalam jangka panjang menimbulkan berbagai penyakit kronis pada masyarakat yang terpapar.



Foto penderita penyakit arsenosis. (Finkelman, dan Tian, 2017).)

Salah satu penyakit yang muncul akibat paparan unsur beracun dari batubara adalah Arsenosis, yaitu keracunan arsenik kronis. Penyakit ini terjadi ketika arsenik masuk ke dalam tubuh secara terus-menerus dalam jangka waktu lama. Penderitanya umumnya mengalami perubahan pada kulit, seperti munculnya bercak kehitaman, penebalan kulit, hingga gangguan kesehatan yang lebih serius. Dalam beberapa kasus, paparan arsenik juga dapat meningkatkan risiko terjadinya kanker. Kondisi ini menunjukkan bagaimana unsur beracun dari pembakaran batubara dapat memberikan dampak kesehatan yang nyata bagi masyarakat.

Selain arsenosis, paparan unsur fluor dari pembakaran batubara juga dapat



Foto penderita penyakit skeletal fluorosis. (Sumber: Finkelman dan Tian, 2017). The Health Impacts of Coal Use in China)

menyebabkan Skeletal fluorosis. Penyakit ini menyerang sistem tulang dan sendi akibat akumulasi fluor dalam tubuh dalam jangka waktu yang lama. Pada tahap awal, penderita biasanya merasakan nyeri pada sendi dan kekakuan pada tulang. Namun seiring waktu, kondisi ini dapat berkembang menjadi perubahan bentuk tulang dan keterbatasan gerak yang serius. Skeletal fluorosis menjadi salah satu contoh bagaimana paparan unsur kimia dari aktivitas pembakaran batubara dapat memengaruhi kesehatan manusia secara perlahan tetapi berdampak jangka panjang.

Kedua kasus tersebut memperlihatkan bahwa dampak pembakaran batubara tidak hanya terbatas pada pencemaran lingkungan, tetapi juga dapat menimbulkan penyakit kronis yang memengaruhi kualitas hidup masyarakat. Oleh karena itu, pengelolaan penggunaan batubara dan upaya pengurangan paparan polutan menjadi langkah penting untuk melindungi kesehatan manusia.

Penulis:
Mahasiswa Teknologi Geologi,
Angkatan 2025.

Dampak dari Air Asam Tambang



Kondisi sungai yang tercemar air asam tambang, tampak warna air yang berubah menjadi kekuningan hingga kemerahan (Anekwe dan Isa, 2022, dalam <https://sediksi.com>).

Oleh: Khalif Rizki Varuska

Air asam tambang, atau dalam bahasa Inggris dikenal sebagai *Acid Mine Drainage (AMD)*, adalah salah satu bentuk pencemaran lingkungan paling serius yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan. Secara sederhana, air asam tambang adalah aliran air baik yang mengalir di permukaan maupun meresap ke dalam tanah yang memiliki keasaman sangat tinggi (pH rendah) karena mengandung asam sulfat serta logam-logam berat terlarut dalam konsentrasi yang melebihi batas aman.

Istilah “asam tambang” tidak hanya merujuk pada air yang dipompa keluar dari terowongan tambang, tetapi juga mencakup seluruh aliran lindi (*leachate*) yang terbentuk dari tumpukan batuan sisa tambang (*waste rock*), kolam penampungan lumpur (*tailings pond*), dan area bekas galian yang terpapar udara dan air hujan. Dengan kata lain, selama material sulfida masih ada dan terpapar, produksi air asam tambang terus berlanjut tanpa henti.

PH air asam tambang umumnya berada di kisaran 2 - 4, setara dengan cuka atau bahkan lebih asam dari jus lemon. Namun dalam kasus ekstrem di beberapa tambang di dunia, pH air yang keluar pernah tercatat mendekati angka 0 tingkat keasaman yang dapat merusak jaringan biologis secara langsung. Selain keasamannya, air ini membawa beban logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), seng (Zn), arsenik (As), kadmium (Cd), dan timbal (Pb) yang larut dalam jumlah sangat tinggi.

dapat bertahan hidup pada pH di bawah 5. Pada pH di bawah 4, hampir seluruh makhluk hidup akuatik musnah. Yang lebih berbahaya, logam berat yang larut dalam suasana asam seperti aluminium menjadi sangat toksik pada pH rendah karena berada dalam bentuk ion Al^{3+} yang dapat merusak insang ikan secara langsung, mengakibatkan kematian massal dalam waktu singkat.

Fenomena yang paling mudah diamati secara visual adalah perubahan warna air sungai menjadi kuning, oranye, hingga kemerahan dikenal sebagai "Yellow Boy". Fenomena ini disebabkan oleh pengendapan besi hidroksida ($Fe(OH)_3$) ketika air asam bertemu dengan air yang memiliki pH lebih tinggi. Endapan ini melapisi dasar sungai, menutupi substrat tempat telur ikan dan organisme bentos hidup, memutus rantai makanan dari tingkat paling dasar.

Di daratan, air asam tambang yang meresap ke dalam tanah menyebabkan pelarutan mineral esensial seperti kalsium, magnesium, dan kalium yang dibutuhkan oleh tanaman. Tanah menjadi miskin nutrisi dan racun bagi sebagian besar vegetasi. Akibatnya, lahan di sekitar tambang menjadi gersang dan kehilangan kemampuannya untuk mendukung pertumbuhan tanaman, memperparah risiko erosi dan longsor. Kontaminasi air tanah juga menjadi ancaman serius bagi sumber air minum masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan tambang.

Pada skala yang lebih luas, pencemaran air asam tambang dapat merambat jauh mengikuti aliran sungai, mencemari kawasan yang sama sekali tidak berhubungan langsung dengan kegiatan tambang. *Estuary* dan muara sungai menjadi akumulasi akhir dari polutan ini, mengancam ekosistem *mangrove* dan terumbu karang yang menjadi habitat penting bagi keanekaragaman hayati pesisir.

Berapa Lama Lingkungan Bisa Terdampak?

Salah satu aspek paling mengkhawatirkan dari air asam tambang adalah durasi dampaknya yang luar biasa panjang. Tidak seperti tumpahan minyak atau limbah organik



Fenomena "Yellow Boy" pengendapan besi hidroksida yang melapisi dasar sungai akibat air asam tambang (Thomson, 2017, dalam <https://thenarwhal.ca>)

yang dapat terurai dalam beberapa tahun, produksi air asam tambang dapat berlangsung selama ratusan bahkan ribuan tahun setelah tambang ditutup. Inilah yang membedakan air asam tambang dari hampir semua jenis pencemaran lainnya: yakni bersifat "aktif" secara kimiawi dan terus memproduksi polutan tanpa membutuhkan aktivitas manusia sama sekali.

Tambang tembaga Rio Tinto di Spanyol adalah salah satu contoh paling dramatis. Tambang ini telah beroperasi sejak zaman Romawi sekitar 3.000 tahun yang lalu, dan hingga hari ini Sungai Rio Tinto masih mengalirkan air berwarna merah darah dengan pH sekitar 2, terlalu asam untuk hampir semua kehidupan akuatik konvensional. Meskipun kegiatan tambang modern telah berlangsung berabad-abad, dampak kimia dari oksidasi mineral sulfida di kawasan tersebut tetap terasa hingga sekarang, menjadikannya salah satu lingkungan paling ekstrem di Bumi dan paradoksnya, menjadi objek studi astrobiologi karena kemiripannya dengan kondisi di Mars.

Di Indonesia, beberapa situs tambang yang sudah tidak aktif selama puluhan tahun masih terus menghasilkan aliran asam yang mencemari lingkungan sekitarnya. Proses produksi asam baru benar-benar berhenti hanya jika seluruh mineral sulfida telah habis teroksidasi atau jika akses oksigen dan air ke material sulfida berhasil dihentikan

sepenuhnya, sebuah kondisi yang sangat sulit dicapai dalam skala lapangan.

Pemulihan ekosistem yang tercemar air asam tambang juga membutuhkan waktu yang sangat panjang setelah sumber pencemarannya diatasi. Kualitas air sungai dapat membaik dalam hitungan tahun hingga dekade, namun pemulihan keanekaragaman hayati terutama populasi ikan dan komunitas bentos seringkali memerlukan waktu puluhan tahun. Tanah yang telah mengalami pengasaman parah membutuhkan waktu hingga satu abad atau lebih untuk pulih secara alami, menjadikan remediasi aktif sebagai satu-satunya pilihan yang realistis untuk pemulihan dalam skala waktu manusia.

Contoh Penanganan Air Asam Tambang

Penanganan air asam tambang pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua pendekatan besar: pencegahan (*prevention*) dan pengolahan (*treatment*). Pendekatan pencegahan dianggap jauh lebih efektif dan ekonomis dalam jangka panjang, karena menghentikan produksi asam sejak dari sumbernya, sedangkan pengolahan bersifat reaktif dan seringkali harus dilakukan selamanya selama sumber asam masih ada.

Pencegahan melalui pengelolaan batuan mengandung sulfida merupakan strategi paling fundamental. Hal ini mencakup penimbunan kembali batuan mengnadung

sulfida ke dalam zona jenuh air di bawah muka air tanah (di mana oksigen tidak tersedia), pelapisan material sulfida dengan lapisan kedap air (*cover system*) untuk memblokir akses oksigen dan air hujan, serta pencampuran material sulfida dengan bahan penetral asam seperti batu kapur dalam perbandingan yang tepat sehingga asam yang terbentuk langsung dinetralkan.

Pengolahan aktif (*active treatment*)

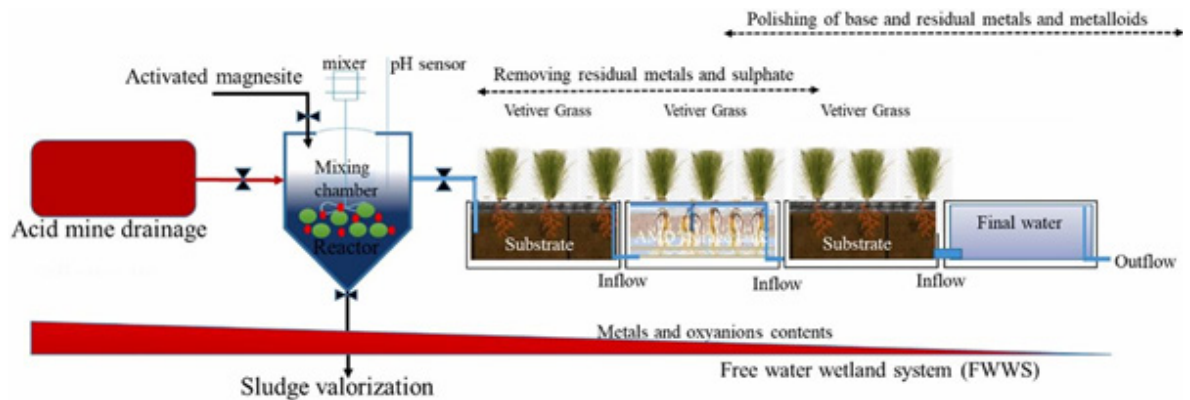
adalah metode yang paling umum diterapkan di tambang-tambang besar yang sudah beroperasi. Prinsipnya adalah dengan menambahkan bahan penetral bersifat basa, paling umum adalah kapur (CaO) atau batu kapur (CaCO_3) ke dalam air asam tambang untuk menaikkan pH dan mengendapkan logam-logam berat dalam bentuk hidroksida atau karbonat yang tidak larut. Endapan ini kemudian dikumpulkan dan dibuang sebagai limbah padat. Meskipun efektif, metode ini memerlukan biaya operasional yang besar, karena proses penetralan harus terus dilakukan selama air asam masih diproduksi.

Pengolahan pasif (*passive treatment*)

memanfaatkan proses alami untuk menetralkan air asam dengan biaya operasional yang jauh lebih rendah. Salah satu contohnya adalah *Anoxic Limestone Drain (ALD)* sebuah saluran yang diisi batu kapur di mana air asam dialirkan dalam kondisi tanpa oksigen, sehingga kapur melarutkan dan menaikkan pH air secara perlahan. Metode lain adalah



Sungai Rio Tinto di Spanyol, telah berwarna merah selama ribuan tahun, akibat kandungan besi dan keasaman tinggi, menjadi lokasi penambangan tembaga, perak, dan emas mulai dari zaman Bangsa Iberia, Tartessos, hingga Kekaisaran Romawi, (Yni, 2024, dalam <https://lahatpos.bacakoran.co>).



Sistem *constructed wetland* (lahan basah buatan) sebagai metode pasif pengolahan air asam tambang (Nguegang dkk., 2022, dalam <https://www.sciencedirect.com>)

Constructed Wetland atau lahan basah buatan yang memanfaatkan bakteri pereduksi sulfat (*sulfate-reducing bacteria/SRB*) dalam substrat organik untuk mengonsumsi sulfat dan menetralkan asam secara biologis, sekaligus mengendapkan logam berat. Metode pasif sangat menjanjikan untuk lokasi terpencil dan tambang yang sudah ditinggalkan.

Contoh penerapan di Indonesia: PT Freeport Indonesia di Papua menerapkan sistem pengolahan air asam tambang skala besar, menggunakan penetralan dengan kapur dan sistem pengendapan berlapis untuk menangani air lindi dari area penambangan terbuka Grasberg. PT Antam di berbagai lokasi juga mengoperasikan instalasi pengolahan air asam tambang sebelum air dibuang ke lingkungan. Namun tantangan terbesar tetap ada pada ribuan tambang rakyat dan bekas tambang yang tidak memiliki sistem pengelolaan air asam sama sekali.

Pendekatan inovatif yang tengah dikembangkan termasuk pemanfaatan air asam tambang yang kaya logam sebagai sumber mineral yang bernilai ekonomi sebuah konsep yang dikenal sebagai *"mine water valorization"*. Penelitian di beberapa negara telah menunjukkan bahwa logam-logam seperti tembaga, seng, dan bahkan unsur tanah jarang dapat diekstrak dari air asam tambang dengan teknologi elektrolisis atau presipitasi selektif, mengubah limbah menjadi sumber daya. Meskipun masih dalam tahap

pengembangan untuk aplikasi skala besar, pendekatan ini membuka harapan baru untuk solusi penanganan air asam tambang yang berkelanjutan.

Penutup

Air asam tambang adalah bukti nyata bahwa kegiatan penambangan meninggalkan warisan lingkungan yang jauh melampaui masa operasionalnya. Selama mineral sulfida ada dan terpapar oksigen serta air, produksi asam dan logam berat akan terus berlanjut tanpa memandang apakah tambang tersebut masih aktif atau sudah ditutup puluhan tahun yang lalu. Ini adalah tantangan yang tidak bisa diselesaikan hanya dengan menutup lubang tambang dan pergi.

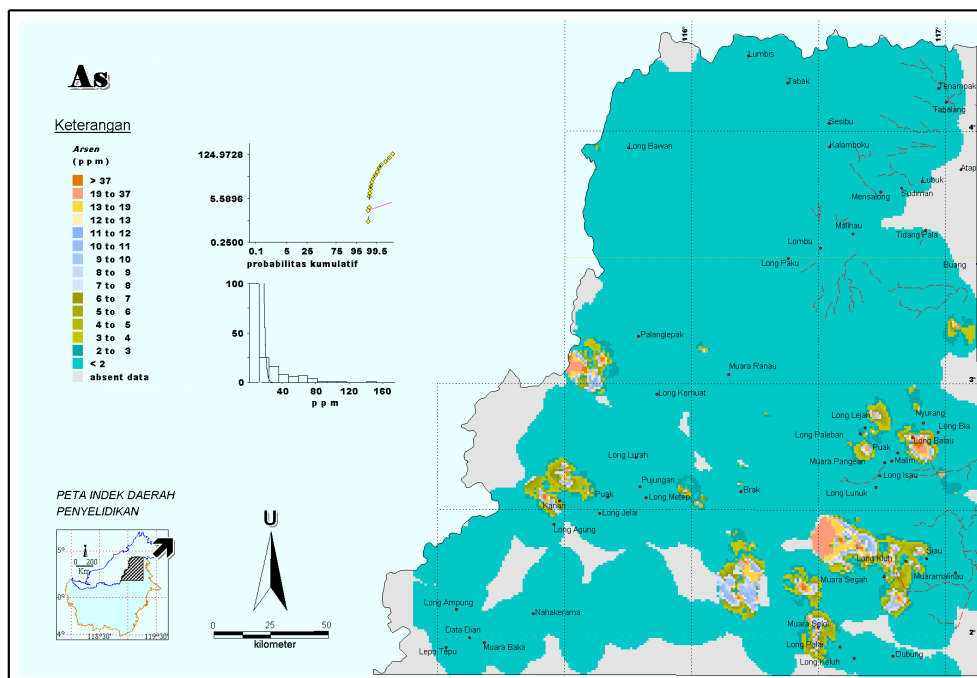
Pendekatan terbaik tetaplah pencegahan sejak perencanaan tambang, yakni memilih metode penambangan yang meminimalkan paparan sulfida, merancang sistem pengelolaan air yang komprehensif sejak awal, dan mengalokasikan dana reklamasi yang memadai sebelum tambang beroperasi. Regulasi yang kuat dan penegakan hukum yang konsisten menjadi kunci untuk memastikan bahwa biaya lingkungan dari pertambangan tidak dibebankan kepada generasi mendatang dan ekosistem yang tidak bersalah.

Penulis:
Mahasiswa Teknologi Geologi, Angkatan 2025

Aplikasi Geokimia pada Geologi Medis

Oleh : Rangga Aura Ramadhan

Kesehatan manusia sangat erat kaitannya dengan kualitas udara, air, dan tanah yang dipengaruhi oleh kondisi geologi regional maupun lokal di mana suatu populasi tinggal. Prinsip ini telah diakui sejak zaman kuno oleh Hippocrates, yang menekankan bahwa untuk memahami kesehatan suatu masyarakat, seseorang harus memperhatikan udara yang mereka hirup, air yang mereka minum, dan tempat di mana mereka hidup.



Peta geokimia sebaran unsur As, sampel endapan sungai -80 mesh, Daerah Kalimantan Utara (Sumartono, dkk., 2014)

Lingkungan geologi merupakan sumber utama dari semua unsur kimia di bumi, di mana kerak bumi menyediakan semua nutrisi yang diperlukan untuk menopang kehidupan melalui proses pelapukan batuan yang melepaskan unsur-unsur tersebut ke lingkungan.

Dampak lingkungan alami terhadap kesehatan tercermin dalam konsep yang lebih luas dari pepatah lama, yaitu: "kita adalah apa yang kita makan, minum, hirup, dan sentuh".

Konsep ini secara akurat menggambarkan bagaimana nutrisi makro seperti besi, kalsium, dan magnesium, serta nutrisi mikro seperti yodium dan selenium, pada akhirnya berasal dari batuan yang ada di permukaan atau di bawah permukaan bumi. Manusia dan hewan memperoleh nutrisi vital ini melalui tanaman yang menyerapnya dari tanah, melalui air yang mengalir di atas batuan, serta dari udara yang dihirup dalam kadar tertentu.

Peran unsur kimia dari batuan

sangat krusial bagi metabolisme, namun keberadaannya harus dalam bentuk yang bioavailable atau dapat diserap oleh sel hidup untuk memberikan manfaat. Batuan melepaskan berbagai unsur melalui interaksi fisik dan kimia yang dipengaruhi oleh iklim serta keberadaan biota di suatu wilayah. Penting untuk dipahami bahwa setiap unsur memiliki rentang dosis optimal; konsentrasi yang terlalu rendah dapat menyebabkan defisiensi, sementara konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menjadi racun bagi organisme, sebagaimana digambarkan dalam kurva dosis-respons.

Secara definisi, geologi medis adalah disiplin ilmu yang mempelajari hubungan antara faktor-faktor geologi dengan masalah kesehatan pada manusia, hewan, dan tumbuhan, termasuk dampak material dan proses geologi alami maupun antropogenik terhadap kesehatan ekosistem. Di sisi lain, geokimia dalam konteks kesehatan berfokus pada mekanisme migrasi nutrisi dari batuan ke tanah hingga ke tubuh makhluk hidup, serta reaksi kimia yang mereka lakukan di dalam tubuh. Kedua bidang ini bersinggungan dalam mempelajari proses biogeokimia yang memengaruhi kesejahteraan makhluk hidup baik secara positif maupun negatif.

Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk memberikan wawasan tentang bagaimana disiplin geokimia memberikan pemahaman mendalam mengenai dampak lingkungan alami terhadap kesehatan manusia dan hewan. Dengan menggunakan pemetaan dan analisis geokimia, kita dapat mengidentifikasi wilayah yang mengalami kelebihan unsur berbahaya atau kekurangan unsur esensial yang fatal. Dengan demikian, artikel ini bertujuan menunjukkan bahwa geokimia adalah alat vital yang membantu melindungi kesehatan masyarakat global melalui identifikasi risiko lingkungan yang bersumber dari material geologi.

Konsep Dasar Geokimia dalam Geologi Medis

Konsep dasar geokimia dalam geologi medis berpangkal pada pemahaman bahwa

kerak bumi adalah sumber utama dari semua unsur kimia yang ada di dunia. Melalui proses pelapukan, batuan mengalami dekomposisi bertahap menjadi mineral penyusun yang melepaskan berbagai unsur nutrisi maupun zat berbahaya ke lingkungan. Unsur-unsur ini kemudian bermigrasi melalui siklus geokimia yang dinamis, mulai dari batuan menuju tanah, air, dan akhirnya masuk ke dalam tubuh manusia melalui konsumsi tanaman, produk hewan, air minum, serta udara yang dihirup. Keterkaitan ini menunjukkan bahwa kesehatan suatu populasi sangat dipengaruhi oleh kualitas material geologi di tempat mereka tinggal.

Mekanisme perpindahan unsur-unsur kimia dari lingkungan ke dalam organisme hidup serta reaksi kimia yang mereka lakukan di dalam tubuh disebut sebagai proses biogeokimia. Proses ini merupakan inti dari disiplin geologi medis karena menentukan bagaimana unsur-unsur tersebut memengaruhi kesejahteraan makhluk hidup, baik secara positif maupun negatif. Penting untuk dipahami bahwa keberadaan suatu unsur di alam tidak secara otomatis berdampak pada kesehatan; unsur tersebut harus berada dalam bentuk yang bioavailable agar dapat diserap oleh sel hidup dan berpartisipasi dalam metabolisme tubuh.

Dalam tubuh manusia, unsur kimia diklasifikasikan berdasarkan konsentrasinya, di mana makronutrien atau unsur mayor dan minor memegang peranan yang sangat luas. Unsur-unsur seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K), dan natrium (Na) adalah komponen esensial yang membentuk sebagian besar struktur tubuh dan mendukung fungsi fisiologis vital, termasuk kesehatan tulang dan jantung. Penelitian menunjukkan adanya korelasi kuat antara kualitas air minum yang kaya akan mineral kalsium dan magnesium (air sadah) dengan penurunan tingkat mortalitas akibat penyakit kardiovaskular.

Di sisi lain, terdapat kelompok mikronutrien seperti yodium (I) dan selenium (Se) yang dibutuhkan dalam jumlah sangat kecil namun tetap bersifat esensial bagi kesehatan. Unsur-unsur ini mengikuti prinsip

kurva dosis-respons, di mana terdapat rentang konsentrasi optimal yang sempit untuk memberikan manfaat maksimal bagi organisme. Kekurangan asupan yodium dapat menyebabkan gangguan seperti gondok dan kretinisme, sementara paparan selenium yang berlebihan, misalnya melalui tanaman yang tumbuh di tanah kaya selenium, dapat memicu toksisitas atau selenosis.

Selain unsur esensial, geologi medis juga memberikan perhatian besar pada unsur toksik seperti arsenik (As), timbal (Pb), dan merkuri (Hg) yang sering kali bersifat berbahaya meskipun dalam jumlah sedikit. Arsenik dapat masuk ke pasokan air minum melalui proses geogenik alami di dalam akuifer dan menyebabkan dampak kesehatan kronis seperti kanker dan lesi kulit. Sementara itu, timbal merupakan logam berat yang sangat berisiko bagi perkembangan sistem saraf anak-anak, dan merkuri yang dilepaskan dari pembakaran batu bara dapat mencemari ekosistem serta membahayakan kesehatan manusia.

Uranium (U) terdapat di beberapa lokasi di Indonesia. Di Pulau Bangka uranium ditemukan sebagai mineral ikutan hasil sampingan penambangan timah (seperti monasit dan zirkon), di mana tingkat akumulasi sisa

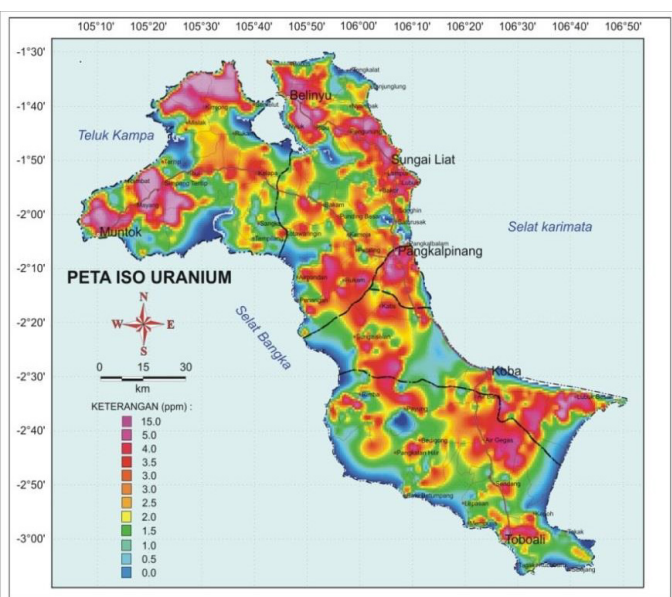
tambang (*tailing*) berpotensi meningkatkan radiasi latar alami (*background radiation*) serta berisiko mencemari tanah dan air tanah melalui pelindian logam berat. Paparan radiasi pengion yang berlebihan dan toksisitas kimia uranium dalam jangka panjang dapat memicu gangguan kesehatan seperti kerusakan ginjal dan peningkatan risiko kanker pada kelompok rentan, meskipun di sisi lain kandungan monasit ini memiliki nilai strategis sebagai potensi sumber daya energi nuklir dan Logam Tanah Jarang (LTJ).

Secara keseluruhan, hubungan antara geokimia lingkungan dan kesehatan menegaskan bahwa pemetaan dan analisis geokimia adalah alat proteksi kesehatan masyarakat yang vital. Dengan mengidentifikasi wilayah yang mengalami anomali geokimia (baik kelebihan unsur toksik maupun defisiensi nutrisi penting) para ahli dapat melakukan langkah mitigasi yang tepat. Melalui pemahaman mendalam tentang interaksi antara material geologi dan tubuh manusia, geokimia membantu melindungi jutaan nyawa dengan memastikan lingkungan tempat tinggal tetap mendukung kehidupan yang sehat.

Pemetaan Geokimia untuk Analisis Kesehatan

Pemetaan geokimia merupakan proses pembuatan peta yang terperinci dan akurat untuk menggambarkan distribusi spasial dari berbagai unsur kimia di permukaan bumi. Dalam disiplin geologi medis, pemetaan ini dipandang sebagai komponen esensial karena menyediakan data dasar mengenai kondisi lingkungan alami yang memengaruhi kesehatan manusia dan hewan. Dengan memvisualisasikan data kimia dalam bentuk peta, peneliti dapat melihat pola migrasi unsur dari batuan ke media lingkungan lainnya secara lebih jelas.

Tujuan utama dari pemetaan ini adalah untuk mengidentifikasi daerah yang kaya akan unsur tertentu maupun daerah yang mengalami defisiensi unsur esensial di dalam tanah, batuan, dan air. Hal ini sangat penting untuk menentukan potensi risiko kesehatan masyarakat, baik yang disebabkan oleh



Peta iso uranium Pulau Bangka (Ngadenin, 2014)

paparan senyawa beracun dalam konsentrasi tinggi maupun akibat kekurangan nutrisi vital yang dibutuhkan tubuh. Identifikasi wilayah anomali geokimia ini memungkinkan dilakukannya langkah pencegahan atau mitigasi sebelum masalah kesehatan berkembang menjadi epidemi luas.

Salah satu contoh proyek pemetaan geokimia global yang paling komprehensif adalah Geochemical Atlas of Europe yang diterbitkan pada tahun 2005 oleh EuroGeoSurveys (EGS). Proyek ini menggunakan metode standarisasi untuk pengambilan sampel air sungai, sedimen, dan tanah di 26 negara Eropa guna menghasilkan dasar geokimia yang konsisten. Hasilnya berupa 360 peta yang menunjukkan distribusi lebih dari 50 unsur di seluruh benua, yang kini menjadi referensi utama bagi studi geologi medis di wilayah tersebut.

Selain di Eropa, proyek pemetaan berskala besar lainnya adalah China Regional Geochemistry–National Reconnaissance (RGNR) Project yang telah dilaksanakan sejak tahun 1978. Proyek ini telah memetakan distribusi 76 unsur kimia di wilayah barat daya dan tenggara China dengan menganalisis ribuan sampel sedimen sungai. Data yang terkumpul memberikan informasi mendalam mengenai nilai latar belakang konsentrasi unsur di China, yang sangat berguna untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah dengan risiko kesehatan geogenik yang signifikan.

Database geokimia yang dihasilkan dari proyek-proyek besar ini memiliki peran vital dalam bidang epidemiologi. Dengan adanya *database* yang dikontrol kualitasnya dan dapat diakses secara daring, peneliti kesehatan dapat mencari korelasi antara variabel lingkungan dengan tren penyakit tertentu pada populasi. Hal ini memudahkan para ahli untuk mengevaluasi apakah tingkat paparan harian suatu zat melalui air minum atau makanan berhubungan langsung dengan efek kesehatan negatif yang diamati dalam survei epidemiologi.

Contoh spesifik pemanfaatan data ini adalah studi mengenai distribusi lithium dalam air minum dan kaitannya dengan

kesehatan mental. Penelitian di beberapa negara, termasuk Amerika Serikat, Jepang, dan Finlandia, menunjukkan bahwa asupan lithium alami dalam dosis rendah secara terus-menerus dapat memberikan dampak positif dalam menurunkan angka bunuh diri. Data dari proyek pemetaan di Eropa menunjukkan bahwa wilayah dengan kadar lithium air tanah yang lebih tinggi cenderung memiliki tingkat bunuh diri yang lebih rendah, sehingga menarik perhatian serius dari para peneliti medis untuk studi lebih lanjut.

Proses Geokimia yang Mempengaruhi Kesehatan

Proses geokimia yang memengaruhi kesehatan manusia dimulai dengan pelepasan unsur kimia dari mineral melalui mekanisme pelapukan (*weathering*) dan disolusi. Pelapukan didefinisikan sebagai proses geologi yang terjadi di permukaan bumi, yang mengakibatkan dekomposisi dan disintegrasi batuan secara bertahap menjadi butiran mineral diskrit serta unsur kimia penyusunnya. Laju proses ini sangat bergantung pada kondisi iklim, jenis batuan, serta keberadaan biota di suatu wilayah, di mana daerah yang hangat dan lembap biasanya mengalami pelapukan lebih cepat. Melalui disolusi mineral, berbagai unsur nutrisi esensial maupun zat yang berpotensi toksik dilepaskan ke media lingkungan.

Setelah terlepas dari batuan induknya, unsur-unsur kimia tersebut mengalami transportasi melalui air, udara, dan tanah. Agen geologi seperti air mengalir, angin, dan es berperan membawa unsur dan senyawa kimia ini dari satu lokasi ke lokasi lainnya di permukaan bumi. Sebagai contoh, debu atmosferik yang mengandung butiran mineral dan patogen dapat terbawa oleh aliran udara melintasi benua dan samudra, sehingga memaparkan populasi yang jauh terhadap zat berbahaya melalui inhalasi atau kontak langsung. Migrasi dinamis unsur-unsur ini dari batuan menuju tubuh makhluk hidup melalui rantai makanan merupakan inti dari studi biogeokimia dalam geologi medis.

Transformasi kimia yang terjadi selama migrasi sangat menentukan bentuk dan potensi

toksisitas suatu unsur. Salah satu proses yang paling krusial adalah oksidasi-reduksi (redoks), yang secara signifikan mengubah kelarutan dan sifat racun unsur seperti arsenik. Arsenik sering kali terikat pada mineral oksida besi, namun dalam kondisi pereduksi yang dipicu oleh aktivitas bakteri, ia dapat berubah menjadi arsenit (As(III)) yang lebih larut dan lebih beracun bagi manusia. Sebaliknya, paparan oksigen dapat mengubahnya kembali menjadi bentuk arsenat (As(V)) yang memiliki mobilitas berbeda, menunjukkan bahwa status oksidasi adalah faktor penentu risiko kesehatan yang utama.

Selain redoks, proses adsorpsi/desorpsi dan kompleksasi juga mengontrol distribusi unsur di lingkungan. Unsur kimia yang terbawa air dapat terserap ke permukaan padatan (adsorpsi) atau dilepaskan kembali ke dalam larutan (desorpsi) tergantung pada dinamika kimia air tersebut. Unsur logam juga sering berinteraksi dengan ligan organik atau anorganik untuk membentuk kompleks kimia, yang memengaruhi seberapa mudah unsur tersebut dapat diserap oleh sel tubuh atau bioavailable. Mineral tertentu seperti lempung memiliki kapasitas adsorpsi yang sangat tinggi, yang secara historis dimanfaatkan untuk mengikat molekul racun di dalam sistem pencernaan.

Kondisi lingkungan sekitar, terutama pH (tingkat keasaman), memiliki pengaruh dominan terhadap stabilitas dan mobilitas unsur-unsur kimia. Sebagai ilustrasi, kalsium fluorida diketahui jauh lebih larut dalam air tanah atau air permukaan yang bersifat asam. Perubahan pH dalam air dapat menentukan apakah suatu toksikan akan tetap terlarut dalam air minum atau mengendap sebagai fase padat yang tidak berbahaya. Secara lebih luas, keseimbangan pH dan keberadaan ion tertentu seperti bikarbonat juga berfungsi sebagai pelindung alami tubuh terhadap keasaman dan berhubungan erat dengan kesehatan tulang serta jantung di wilayah tertentu.

Penting untuk membedakan antara sumber unsur kimia yang bersifat geogenik (alami) dan antropogenik (aktivitas manusia). Sumber geogenik mencakup material alami

seperti pelapukan batuan, emisi vulkanik yang melepaskan gas asam serta logam berat, hingga debu gurun alami. Di sisi lain, sumber antropogenik melibatkan aktivitas manusia seperti pertambangan, pembakaran batu bara, serta penggunaan pestisida dan bahan kimia industri yang secara sengaja atau tidak menambahkan zat berbahaya ke dalam siklus geologi. Dalam banyak kasus, aktivitas manusia dapat mempercepat atau memperburuk pelepasan alami zat beracun yang sebelumnya tersimpan aman di dalam formasi geologi.

Pemahaman atas berbagai proses geokimia ini adalah kunci untuk menentukan potensi risiko kesehatan pada populasi tertentu. Dengan memetakan jalur transportasi dan transformasi kimia suatu unsur, peneliti dapat mengevaluasi bagaimana manusia terpapar toksikan melalui air minum, udara yang dihirup, atau makanan yang dikonsumsi. Penilaian risiko yang akurat harus mempertimbangkan total dosis yang diterima tubuh dari semua jalur paparan tersebut. Oleh karena itu, disiplin geokimia bertindak sebagai alat proteksi vital yang membantu mengidentifikasi wilayah anomali kimia sebelum dampak kesehatan yang serius berkembang menjadi epidemi.

Dampak Unsur Geokimia terhadap Kesehatan

Paparan terhadap unsur toksik seperti arsenik, timbal, merkuri, dan silika menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan bagi manusia. Ingesti air minum yang kaya akan arsenik dapat menyebabkan keratosis, kanker kulit, kanker kandung kemih, hingga gangguan organ serius seperti penyakit hati non-sirotik. Sementara itu, timbal merupakan logam berat yang sangat berbahaya bagi anak-anak karena dapat merusak sistem saraf, ginjal, serta menghambat perkembangan fisik dan mental. Merkuri, yang sering dilepaskan dari pembakaran batu bara, juga bersifat racun yang dapat memicu kerusakan sistem saraf pusat. Di sisi lain, inhalasi kristal silika secara terus-menerus dapat menyebabkan silikosis atau pembentukan jaringan parut pada paru-paru yang bersifat progresif dan fatal.

Berbeda dengan unsur toksik, unsur esensial dibutuhkan oleh tubuh dalam jumlah tertentu, namun ketidakseimbangannya tetap berdampak buruk. Kekurangan yodium mengganggu sintesis hormon tiroid yang sangat penting bagi metabolisme, sehingga mengakibatkan penyakit gondok, gangguan kognitif, hingga kondisi kretinisme pada anak-anak. Unsur mikro esensial lainnya seperti selenium memegang peranan penting dalam menjaga imunitas dan metabolisme tubuh, di mana kadar yang optimal membantu mencegah berbagai penyakit termasuk beberapa jenis kanker. Namun, selenium memiliki rentang dosis optimal yang sempit, di mana kekurangan maupun kelebihan asupan (*selenosis*) sama-sama dapat menimbulkan dampak kesehatan yang merugikan.

Beberapa material geologi spesifik juga diklasifikasikan sebagai bahan berbahaya karena sifat fisik dan kimianya yang merusak jaringan tubuh. Inhalasi serat asbes yang bersifat tahan lama secara mekanis dapat menyebabkan peradangan kronis di paru-paru, yang memicu asbestosis, mesothelioma, hingga kanker paru-paru. Unsur fluor juga menunjukkan dampak yang kontradiktif; meski bermanfaat untuk kesehatan gigi dalam dosis rendah, konsumsi berlebih melalui air minum menyebabkan fluorosis yang ditandai dengan bintik-bintik hitam pada gigi (*mottling*) hingga deformasi tulang yang menjadi rapuh. Hal ini menegaskan pentingnya regulasi asupan fluor agar tetap berada dalam batas manfaat maksimal tanpa menimbulkan efek toksik.

Terakhir, debu mineral yang mengandung berbagai butiran mineral dan patogen menjadi penyebab utama berbagai penyakit pernapasan di seluruh dunia. Partikel debu halus yang berukuran kurang dari 2,5 mikrometer mampu menembus jauh ke dalam paru-paru dan memicu infeksi seperti pneumonia, influenza A, hingga kondisi yang dikenal sebagai penyakit Al Eskan pada personel militer di Timur Tengah. Paparan debu dalam jangka panjang, baik dari sumber alami seperti badai gurun maupun aktivitas manusia seperti pertambangan, juga dikaitkan dengan risiko pneumokoniosis dan gangguan fungsi paru-paru kronis. Oleh karena itu, studi geologi medis sangat bergantung

pada data geokimia untuk memitigasi risiko kesehatan yang ditimbulkan oleh material-material lingkungan ini.

Peran Senyawa Organik dalam Geologi Medis

Senyawa organik geogenik merupakan komponen penting dalam studi geologi medis karena keberadaannya yang luas di lingkungan alami. Sumber utama dari senyawa ini adalah deposit karbon fosil seperti batubara, petroleum, dan sedimen kaya organik. Meskipun banyak senyawa organik yang bersifat jinak, beberapa di antaranya dapat menjadi racun jika termobilisasi secara alami melalui pelindian ke dalam air tanah atau diperparah oleh aktivitas manusia seperti penambangan. Fokus utama penelitian geologi medis dalam konteks ini adalah memahami bagaimana material geogenik ini melepaskan molekul organik yang dapat memengaruhi kesejahteraan manusia secara kronis.

Salah satu kelompok senyawa organik yang paling berbahaya bagi kesehatan manusia adalah *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)*, yang banyak ditemukan dalam batubara dan minyak bumi. PAH dapat masuk ke lingkungan melalui emisi pembakaran maupun sebagai debu batubara yang tidak terbakar dari aktivitas penambangan. Senyawa ini menjadi perhatian khusus karena toksisitasnya yang tinggi dan kemampuannya untuk bertahan lama di lingkungan, sehingga menimbulkan risiko kesehatan serius bahkan pada tingkat paparan yang rendah.

Manusia dapat terpapar senyawa organik berbahaya ini melalui berbagai jalur utama, yaitu air, udara, dan makanan. Kontaminasi air minum terjadi ketika senyawa organik dari lapisan batubara melindi ke dalam akuifer yang digunakan oleh masyarakat. Paparan melalui udara melibatkan penghirupan partikulat debu batubara yang kaya akan PAH, sementara paparan melalui makanan dapat terjadi jika tanaman pangan menyerap kontaminan organik dari tanah yang tercemar. Jalur-jalur ini sering kali saling berkaitan dan berkontribusi terhadap dosis total kontaminan yang diterima tubuh.

Dampak kesehatan yang signifikan dari paparan senyawa organik ini mencakup berbagai jenis penyakit ginjal, seperti *Balkan Endemic Nephropathy (BEN)*. Penyakit ginjal fatal ini dikaitkan dengan konsumsi air sumur yang terkontaminasi oleh pelindian senyawa organik dari batubara lignit berumur Pliosen. Selain itu, peningkatan prevalensi gagal ginjal juga diamati pada populasi yang tinggal di wilayah dengan akuifer yang berasosiasi langsung dengan deposit batubara rank rendah.

Selain masalah ginjal, paparan kronis terhadap senyawa organik geogenik seperti PAH sangat erat kaitannya dengan risiko kanker. Berbagai studi menunjukkan adanya korelasi antara lingkungan kaya batubara dengan tingginya angka kanker saluran kemih, ginjal, dan paru-paru. Di wilayah penambangan tertentu, partikulat udara yang mengandung campuran kompleks senyawa organik dari debu batubara diidentifikasi sebagai faktor risiko utama yang meningkatkan angka mortalitas akibat kanker pada masyarakat sekitar.

Studi Kasus Geologi Medis

Balkan Endemic Nephropathy (BEN) merupakan penyakit ginjal fatal yang bersifat kronis dan terjadi secara spesifik di desa-desa pedesaan di sepanjang anak sungai Danube di Bosnia, Bulgaria, Kroasia, Rumania, dan Serbia. Secara klinis, penyakit ini berupa *nefropati tubulo-interstitial* yang tidak menunjukkan gejala hingga terjadi gagal ginjal stadium akhir, biasanya pada usia 50–70 tahun. Penyakit ini sangat erat kaitannya dengan lingkungan karena hanya menyerang individu yang telah tinggal di desa endemik selama 20 tahun atau lebih.

Terdapat beberapa hipotesis utama mengenai penyebab BEN, termasuk paparan toksin alami seperti *ochratoxin A* dari jamur pada biji-bijian dan asam aristolokhat (AA) dari tanaman *Aristolochia*. Namun, kedua toksin ini tersebar luas secara global, sehingga sulit menjelaskan mengapa BEN hanya terbatas secara geografis di wilayah Balkan saja. Hal ini mendorong para peneliti untuk melihat faktor geologi lokal, khususnya hubungan antara

lokasi desa dengan deposit batubara.

Hipotesis penyebab yang paling kuat berkaitan dengan senyawa organik dari batubara, di mana terdapat korelasi erat antara desa endemik dengan deposit lignit Pliosen. Lignit yang sangat muda ini melepaskan senyawa organik beracun yang larut ke dalam air tanah yang digunakan warga sebagai sumber air minum. Senyawa seperti hidrokarbon aromatik polisiklik dan amina aromatik yang terlepas melalui proses pelindian alami diduga kuat memicu kerusakan ginjal secara perlahan.

Hubungan antara lignit dan kesehatan juga terlihat pada tingginya kasus kanker panggul ginjal (*Urothelial cancer*), yang mencapai hampir 50% pada pasien BEN. Fenomena serupa ditemukan di Amerika Serikat, seperti di Louisiana dan Wyoming, di mana wilayah dengan akuifer yang bersentuhan dengan lignit menunjukkan tingkat kematian akibat kanker ginjal yang lebih tinggi. Kontaminasi air minum oleh kontaminan organik ini telah melahirkan konsep „*panendemic nephropathy*” untuk menjelaskan penyakit serupa di seluruh dunia.

Dampak pertambangan batubara, terutama metode *Mountaintop Removal (MTR)*, secara signifikan menyebabkan penurunan kualitas air. Penempatan tanah penutup batubara di lembah-lembah mempercepat pelindian zat berbahaya seperti selenium, arsenik, dan senyawa organik ke dalam air permukaan dan air tanah. Hal ini menyebabkan air di area pertambangan memiliki konduktivitas dan pH yang jauh lebih tinggi dibandingkan area non-tambang.

Selain air, polusi udara dari aktivitas pertambangan juga menjadi ancaman serius bagi kesehatan masyarakat. Partikulat udara

(PM10 dan PM2.5) yang dihasilkan dari peledakan, debu jalanan, dan pemrosesan batubara mengandung aluminosilikat serta senyawa organik beracun. Paparan partikulat ini telah dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, penyakit pernapasan, hingga kanker paru-paru pada masyarakat yang tinggal di sekitar lokasi tambang.

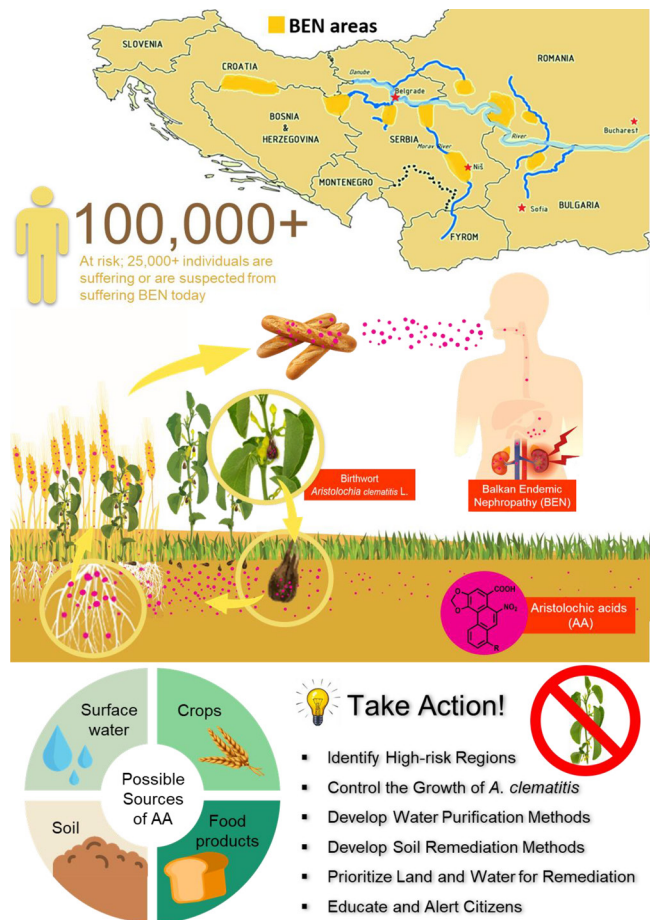
Dalam studi kasus geologi medis lainnya, fluorosis di air tanah menjadi masalah besar di daerah granitik dan vulkanik seperti di India dan Afrika Timur. Air tanah di wilayah ini sering kali mengandung kadar fluor yang tinggi akibat proses geokimia alami, yaitu pelapukan mineral seperti fluorit dan apatit dari batuan granit. Kondisi pH yang tinggi dalam air tanah semakin meningkatkan kelarutan fluor, sehingga memperbesar konsentrasinya dalam sumber air.

Jalur paparan utama fluorosis adalah melalui konsumsi air minum dan makanan yang dimasak dengan air terkontaminasi tersebut. Dampak kesehatannya meliputi dental fluorosis yang menyebabkan perubahan warna dan kerusakan gigi, serta skeletal fluorosis yang memicu pengerasan tulang dan deformasi sendi yang menyakitkan. Kasus ini memberikan signifikansi geologi medis yang penting: bahwa kadar unsur esensial yang berlebih pun dapat menjadi racun yang berbahaya bagi kesehatan manusia.

Metode Analisis Geokimia, Mitigasi dan Pengelolaan Risiko

Metode analisis geokimia merupakan landasan utama dalam studi geologi medis untuk memahami bagaimana unsur makro dan mikro bermigrasi dari batuan ke dalam tubuh manusia. Proses ini sangat penting karena kesehatan manusia secara langsung dipengaruhi oleh apa yang dimakan, diminum, dan dihirup dari lingkungan alam. Dengan menggunakan teknik geokimia, para ahli dapat mengidentifikasi mekanisme biogeokimia yang menentukan apakah suatu unsur akan berdampak baik atau buruk bagi kesehatan.

Langkah awal yang krusial adalah pengambilan sampel yang dilakukan secara sistematis pada berbagai media lingkungan



Asam aristolochia yang dilepaskan dari gulma *Aristolochia clematitis* yang membusuk mencemari tanah dan tanaman pangan di Eropa Timur dan merupakan salah satu penyebab utama nefropati endemik Balkan. Langkah-langkah diambil untuk mencegah manusia terpapar fitotoksin ini. Perlu mengembangkan metode remediasi (Chan, dkk., 2013).

seperti tanah, air, dan sedimen. Dalam berbagai proyek pemetaan geokimia skala besar, sampel air sungai, sedimen aliran, serta berbagai lapisan tanah mulai dari lapisan organik atas hingga subsoil pada kedalaman tertentu dikumpulkan untuk menetapkan *baseline* geokimia suatu wilayah. Pengambilan sampel yang akurat memastikan bahwa data yang dihasilkan mencerminkan kondisi geologi lingkungan yang sebenarnya.

Dalam hal teknik analisis, *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)* menjadi instrumen unggulan karena

kemampuannya mendeteksi hingga puluhan unsur sekaligus dalam konsentrasi yang sangat rendah. Teknik ini sangat efektif untuk menganalisis unsur jejak seperti litium dan arsenik dalam air sungai dengan batas deteksi yang sangat sensitif. Penggunaan teknologi canggih ini memungkinkan para peneliti untuk mendapatkan data yang harmonis dan dapat dibandingkan di tingkat internasional.

Selain itu, teknik *X-ray Fluorescence* (XRF) sering digunakan untuk menentukan konsentrasi total berbagai unsur dalam tanah, terutama pada lahan pertanian dan penggembalaan. Untuk analisis unsur tertentu, metode spektroskopi emisi atom atau teknik terkait seperti AAS (yang sering digunakan dalam program pemetaan nasional) membantu dalam melengkapi basis data unsur kimia. Kombinasi berbagai teknik laboratorium ini memastikan cakupan analisis yang luas terhadap ribuan senyawa yang mungkin terkandung dalam material geologi seperti batubara atau tanah.

Setelah data diperoleh, analisis data dilakukan melalui statistik geokimia untuk menurunkan nilai rata-rata dan nilai latar belakang (*background values*) suatu wilayah. Statistik ini memungkinkan para ahli untuk membedakan antara konsentrasi unsur yang terjadi secara alami dengan peningkatan yang disebabkan oleh aktivitas manusia atau anomali geologi. Data statistik ini menjadi dasar untuk mengevaluasi apakah suatu daerah mengalami defisiensi unsur esensial atau kelebihan unsur beracun.

Hasil analisis statistik tersebut kemudian dituangkan ke dalam interpretasi peta geokimia yang mendetail. Peta-peta ini berfungsi sebagai alat visual yang kritis untuk mengidentifikasi wilayah yang berisiko tinggi terhadap paparan senyawa toksik. Melalui peta ini, geolog medis dapat mengaitkan distribusi unsur kimia dengan pola penyakit tertentu di masyarakat, seperti hubungan antara deposit lignit dengan kasus penyakit ginjal kronis.

Dalam strategi mitigasi, monitoring geokimia lingkungan menjadi langkah preventif yang esensial, terutama di area yang terpapar aktivitas industri atau

pertambangan. Contohnya, pemantauan pada area penambangan batubara membantu mendeteksi pelindian zat berbahaya ke dalam air permukaan sebelum berdampak luas pada ekosistem dan kesehatan warga sekitar. Monitoring yang berkelanjutan memungkinkan identifikasi dini terhadap perubahan kualitas lingkungan akibat proses geokimia alami maupun antropogenik.

Upaya mitigasi berikutnya adalah pengolahan air minum dan penyediaan sumber air yang lebih aman. Di wilayah yang memiliki air tanah dengan kadar arsenik atau fluor yang tinggi secara alami, masyarakat didorong untuk beralih menggunakan air permukaan yang telah diolah atau sistem air publik yang teruji. Langkah ini terbukti efektif dalam mengurangi risiko terpapar toksikan geogenik yang dapat menyebabkan penyakit fatal seperti kanker panggul ginjal atau fluorosis.

Edukasi masyarakat juga memegang peranan penting dalam pengelolaan risiko kesehatan berbasis geologi. Dengan mempublikasikan atlas geokimia, seperti atlas air minum kemasan, konsumen diberikan informasi yang transparan untuk memilih produk yang sesuai dengan kebutuhan kesehatan dan selera mereka. Pengetahuan tentang komposisi kimia air dan tanah membantu masyarakat menghindari konsumsi bahan pangan atau air dari wilayah yang diketahui memiliki anomali unsur berbahaya.

Terakhir, peran pemerintah dan *geologist* sangat vital dalam mengoordinasikan penelitian dan menetapkan regulasi batas aman unsur kimia di lingkungan. Kolaborasi antara lembaga geologi nasional dan pakar kesehatan diperlukan untuk menyusun pedoman kualitas lingkungan yang didasarkan pada data epidemiologi dan geokimia yang kuat. Geologi medis pada akhirnya menjadi alat penting yang membantu pemerintah melindungi kesehatan jutaan orang melalui pemahaman mendalam tentang lingkungan alam kita.

Penulis :
Mahasiswa Teknologi Geologi
Angkatan 2024

Mekanisme Intrusi Air Laut dan Aspek Geologi

Oleh: Izzatullah Muhammad Al-kind



Area Pesisir Semarang dalam Getir Tata Kelola Air (Sumber: Balairungpress, 2021)

Intrusi Air Laut

Intrusi air laut merupakan fenomena ketika air asin dari laut masuk ke dalam sistem akuifer daratan. Secara alami, batas antara air tawar dan air asin di daerah pesisir diatur oleh keseimbangan hidrostatik. Air tawar yang berasal dari hujan dan aliran sungai menekan air laut sehingga terbentuk zona transisi yang relatif stabil.

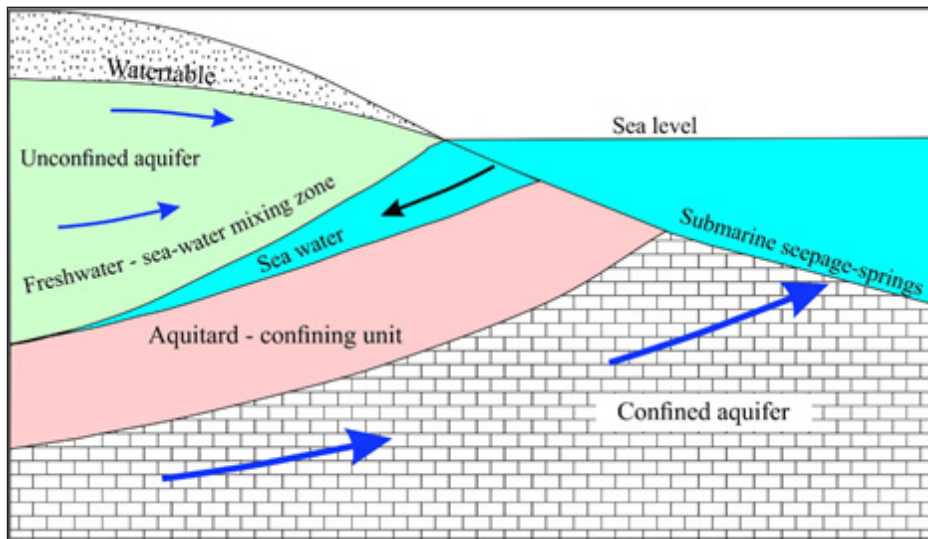
Namun, gangguan muncul ketika tekanan air tawar berkurang akibat eksploitasi berlebihan, perubahan iklim, atau berkurangnya *recharge* (pengisian ulang) air tanah. Pada titik ini, air laut mulai merembes ke dalam akuifer daratan, mencemari sumber air bersih yang digunakan masyarakat. Fenomena ini paling sering terjadi di wilayah pesisir dengan akuifer dangkal, terutama di daerah dengan urbanisasi tinggi dan kebutuhan air yang besar. Intrusi air laut bukan hanya masalah hidrologi, tetapi juga geologi lingkungan karena melibatkan interaksi antara

batuan, air tanah, dan proses geokimia.

Air laut memiliki karakteristik fisika dan kimia yang berbeda dengan air tawar. Secara fisika, densitas air laut lebih tinggi karena kandungan garam (salinitas) yang mencapai rata-rata 35%. Perbedaan densitas ini menyebabkan terbentuknya *interface* (zona peralihan) antara air tawar dan air asin di bawah permukaan.

Secara kimia, air laut kaya akan ion-ion utama seperti Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , dan SO_4^{2-} . Ketika masuk ke dalam akuifer, ion-ion ini berinteraksi dengan mineral penyusun batuan, memicu proses pelarutan, pertukaran ion, dan bahkan perubahan sifat hidrogeokimia air tanah.

Dalam konteks geologi lingkungan, sifat keberlanjutan dari intrusi ini membuatnya sulit dikendalikan. Sekali air asin masuk ke akuifer, proses pemulihannya membutuhkan waktu lama karena harus menunggu *recharge* air tawar yang cukup untuk mendorong kembali air laut ke posisi semula.



Interaksi air tawar dan air laut dalam akuifer pesisir (Coastal Aquifers; Groundwater at Sea – Geological Digressions, 2016).

Mekanisme Intrusi Air laut

Mekanisme intrusi air laut dijelaskan melalui Hukum *Ghyben-Herzberg*, yang menyatakan bahwa setiap satu meter muka air tawar di atas permukaan laut mampu menahan sekitar 40 meter air asin di bawahnya. Prinsip ini menjadi dasar untuk memahami keseimbangan antara air tawar dan air asin di daerah pesisir.

Namun, keseimbangan ini sangat rapuh. Ketika muka air tanah turun akibat eksploitasi berlebihan, tekanan hidrostatik air tawar melemah. Air laut yang memiliki densitas lebih tinggi kemudian terdorong masuk ke akuifer daratan. Proses ini dapat terjadi melalui beberapa mekanisme.

Perembesan lateral adalah proses masuknya air asin dari laut ke daratan secara mendatar melalui akuifer bawah tanah, yang terjadi ketika keseimbangan tekanan hidrostatik antara air tawar dan air laut terganggu. Dalam kondisi normal, air tawar yang lebih ringan menekan air laut yang lebih padat sehingga terbentuk *interface zone* yang stabil. Namun, ketika muka air tanah menurun akibat eksploitasi berlebihan atau berkurangnya *recharge* dari hujan, tekanan air tawar melemah dan memberi peluang bagi air laut untuk merembes masuk secara horizontal. Pergerakan ini berlangsung perlahan tetapi konsisten, sehingga zona transisi antara air tawar dan air

asin bergeser ke arah daratan dan melebar.

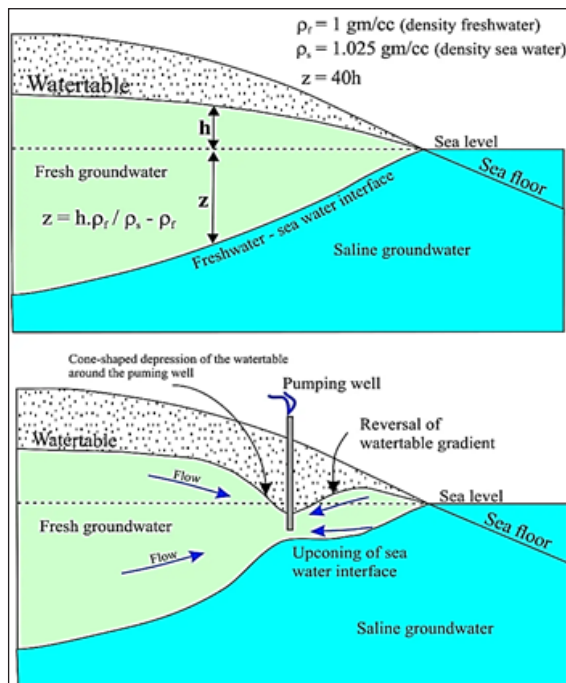
Faktor litologi akuifer berperan penting, batuan berporositas tinggi seperti pasir atau batu gamping yang memiliki rekahan, lebih rentan terhadap perembesan lateral dibanding batuan kompak. Dampaknya nyata, mulai dari meningkatnya salinitas air sumur, terganggunya pertanian karena tanah menjadi asin, hingga kerugian ekonomi masyarakat pesisir yang harus mencari sumber air alternatif.

Upconing adalah mekanisme intrusi air laut yang terjadi ketika air asin dari lapisan bawah akuifer terdorong naik ke arah sumur pompa akibat penurunan muka air tanah yang terlalu cepat dan intensif. Saat sumur bor dipompa berlebihan, tekanan hidrostatik air tawar melemah sehingga air asin yang berada di bawah terdorong ke atas membentuk kerucut intrusi di sekitar dasar sumur. Fenomena ini umum terjadi di daerah pesisir dengan akuifer berlapis, di mana air asin secara alami berada di bawah air tawar. Akibatnya, air sumur yang semula segar perlahan menjadi payau atau asin, menurunkan kualitas air dan mempercepat kerusakan sumber daya air tanah.

Difusi molekuler adalah mekanisme intrusi yang lebih halus dan berlangsung secara alami tanpa adanya aliran besar. Proses ini terjadi ketika ion-ion garam dari

air laut merembes masuk ke air tawar melalui pergerakan molekul secara difusi. Walaupun pergerakannya sangat lambat, difusi molekuler berlangsung terus-menerus sehingga dalam jangka panjang dapat meningkatkan salinitas air tanah meskipun tidak ada eksploitasi berlebihan. Mekanisme ini biasanya terjadi di zona transisi antara air tawar dan air asin, di mana perbedaan konsentrasi ion mendorong perpindahan molekul garam ke arah air tawar. Dampaknya mungkin tidak langsung terasa, tetapi akumulasi jangka panjang dapat mengubah kualitas air tanah dan memperburuk intrusi di wilayah pesisir.

Selain faktor hidrostatik, kondisi geologi juga berperan besar. Akuifer berpasir dengan porositas dan permeabilitas tinggi lebih rentan terhadap intrusi dibanding akuifer yang tersusun dari batuan lempungan atau tufan yang relatif kedap. Struktur geologi seperti



Skema Hukum Ghyben-Herzberg yang menjelaskan keseimbangan air tawar dan air asin di akuifer pesisir (atas). Intrusi air laut akibat pemompaan (bawah). (Sumber: Reilly & Goodman, The Ghyben-Herzberg Relation, 1985.)

patahan atau rekahan juga dapat menjadi jalur cepat bagi air laut untuk masuk ke daratan.

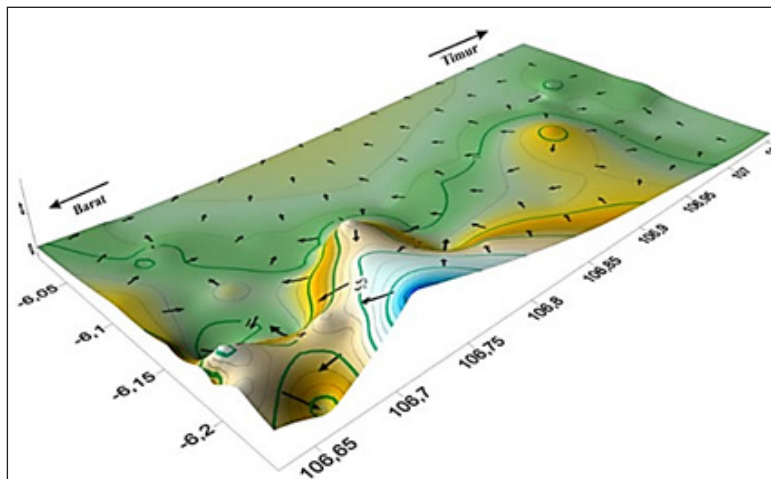
Dari sisi hidrogeokimia, intrusi air laut tidak hanya membawa garam, tetapi juga ion-ion yang dapat memicu reaksi kimia dengan mineral akuifer. Misalnya, ion Na^+ dan Cl^- dapat menyebabkan pelarutan mineral karbonat, sementara Mg^{2+} dan SO_4^{2-} dapat memengaruhi kualitas air tanah dengan meningkatkan kekerasan dan keasaman. Dengan demikian, mekanisme intrusi air laut adalah hasil interaksi antara tekanan hidrostatik, sifat fisika-kimia air laut, dan kondisi geologi akuifer.

Jakarta dan Semarang dalam Ancaman Intrusi Air Laut

Intrusi air laut di pesisir utara Jawa, khususnya Jakarta dan Semarang, menjadi contoh nyata bagaimana tekanan urbanisasi dan eksploitasi sumber daya alam dapat mengganggu keseimbangan hidrogeologi. Di Jakarta, kebutuhan air tanah meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan industri, menyebabkan penurunan muka air tanah hingga lebih dari satu meter per tahun di beberapa lokasi. Kondisi ini melemahkan tekanan hidrostatik yang seharusnya menahan air asin, sehingga intrusi air laut merembes masuk ke akuifer dangkal.

Terlepas dari eksploitasi air tanah yang berlebihan, karakteristik geologi pesisir utara Jawa juga memperkuat terjadinya intrusi air laut. Jakarta berada di atas endapan aluvial muda yang tersusun oleh pasir, lanau, dan lempung dengan porositas tinggi. Akuifer berpasir di kawasan ini sangat permeabel, sehingga ketika muka air tanah turun, air laut dengan densitas lebih besar mudah merembes masuk melalui pori-pori batuan. Selain itu, keberadaan rekahan dan patahan kecil di bawah permukaan mempercepat pergerakan air asin ke arah daratan. Proses ini menjelaskan fenomena *upconing*, di mana air asin dari lapisan bawah naik ke sumur akibat penurunan tekanan air tawar.

Dampaknya terlihat jelas pada sumur-sumur masyarakat yang berubah menjadi payau, menurunkan kualitas air bersih, dan memaksa warga mencari sumber

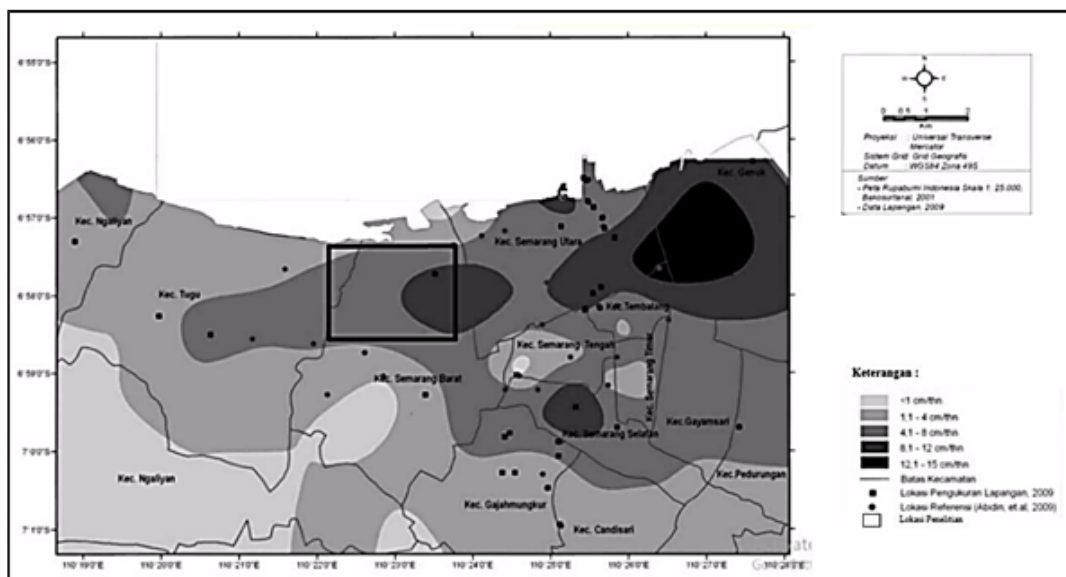


Model 3D aliran air tanah daerah Jakarta Visualisasi ini menggambarkan pergerakan air tanah dari selatan ke utara serta potensi intrusi air laut di wilayah pesisir. (Sumber: Wulan Dwi Kusumah Asih dkk., 2024)

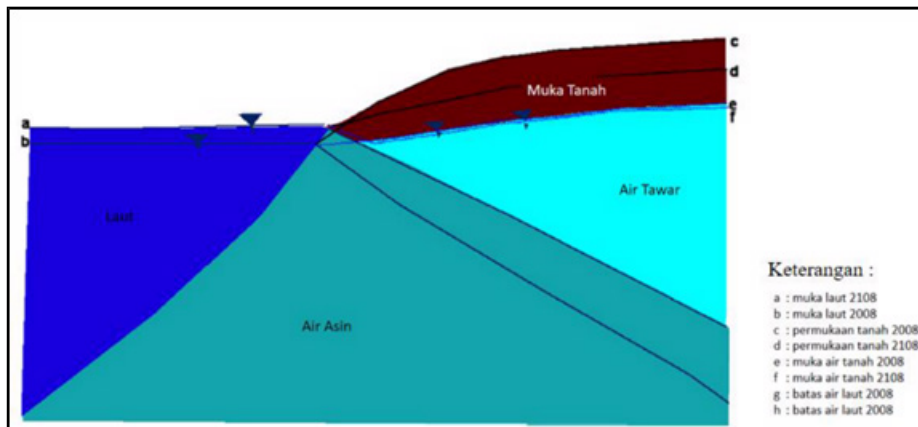
air alternatif. Intrusi ini diperparah oleh *land subsidence* yang mencapai rata-rata 4-6 cm per tahun di Jakarta Utara, menjadikan kota semakin rentan terhadap banjir *rob* (genangan air di wilayah pesisir yang disebabkan oleh air laut pasang, bukan curah hujan tinggi, dan sering diperparah oleh perubahan iklim serta penurunan muka tanah).

Semarang menghadapi tantangan serupa, meskipun dengan karakteristik geologi yang berbeda. Kota ini mengalami kombinasi antara penurunan muka tanah akibat eksploitasi air

tanah dan beban bangunan, serta tekanan dari kenaikan muka laut. Intrusi air laut di Semarang tidak hanya menurunkan kualitas air tanah, tetapi juga memperburuk banjir pesisir yang sudah menjadi masalah tahunan. Intrusi air laut di Semarang juga dipengaruhi oleh struktur geologi cekungan yang memfasilitasi pergerakan air asin ke arah akuifer bebas yang menyebabkan sumur-sumur di kawasan pesisir menunjukkan peningkatan salinitas, dan masyarakat pesisir harus beradaptasi dengan kondisi air yang tidak lagi layak konsumsi.



Peta laju penurunan tanah di Kota Semarang. Daerah Tambakharjo mengalami penurunan tanah 4,1–8 cm per tahun, memperkuat hubungan antara intrusi air laut dan *subsidence* (Sumber: Ismanto dkk., 2012)



Sketsa pengaruh kenaikan muka air laut terhadap intrusi air laut. Diagram menunjukkan pergeseran batas air asin dan air tawar antara tahun 2008 dan 2108 di Semarang (Sumber: Rahmawati dkk., 2013)

Kedua kota tersebut memperlihatkan bagaimana teori mekanisme intrusi air laut yang dijelaskan melalui hukum *Ghyben-Herzberg* benar-benar terwujud dalam realitas sehari-hari. Penurunan muka air tanah melemahkan tekanan hidrostatik, air laut dengan densitas lebih tinggi masuk ke daratan, dan ion-ion garam berinteraksi dengan mineral akuifer sehingga kualitas air tanah semakin memburuk. Intrusi air laut di Jakarta dan Semarang bukan sekadar fenomena geologi, melainkan krisis berlapis yang menghubungkan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi.

Upaya Pengendalian dan Dampak Intrusi

Dari sisi geologi, masuknya air asin ke akuifer mengubah karakter mineral dan struktur batuan. Ion-ion seperti Na^+ dan Cl^- menyebabkan pelarutan mineral karbonat dan pertukaran ion dengan Ca^{2+} dan Mg^{2+} , sehingga kualitas air tanah menurun dan mempercepat korosi pada infrastruktur bawah tanah. Dalam jangka panjang, perubahan kimia ini dapat mengubah porositas dan permeabilitas batuan, menjadikan akuifer semakin rentan terhadap intrusi lanjutan.

Secara lingkungan, intrusi air laut menurunkan ketersediaan air tawar dan mengganggu ekosistem pesisir. Tanah menjadi salin, dan produktivitas lahan menurun. Dari sisi sosial, masyarakat pesisir menghadapi krisis air bersih, meningkatnya biaya hidup, dan risiko kesehatan akibat konsumsi air payau. Sementara secara ekonomi, industri dan sektor

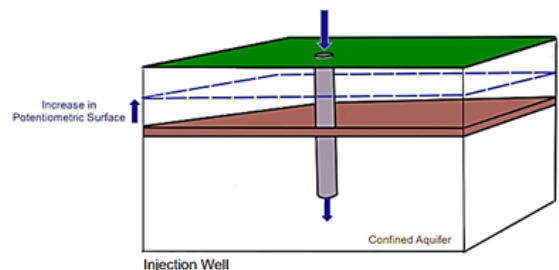
pariwisata yang bergantung pada air tawar terancam berhenti. Untuk mengendalikan fenomena ini, diperlukan strategi terpadu yang mencakup pendekatan geoteknik, hidrogeologi, dan kebijakan tata ruang.

Konservasi dan pengelolaan air tanah, membatasi eksploitasi sumur bor, menerapkan sistem recharge buatan (*artificial recharge*) dengan sumur injeksi, dan memanfaatkan air hujan untuk mengisi kembali akuifer.

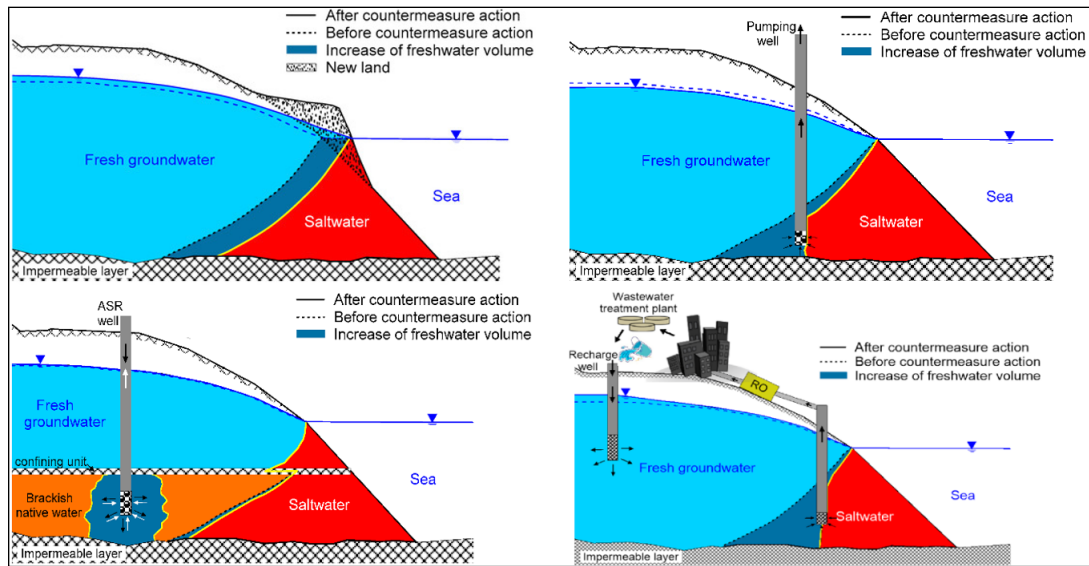
Pembangunan sumur pantau (*monitoring wells*), digunakan untuk memantau fluktuasi muka air tanah dan salinitas secara berkala, sehingga intrusi dapat dideteksi lebih dini.

Pembuatan *barrier* hidrolik atau sumur penghalang, sistem injeksi air tawar di zona pesisir untuk menahan pergerakan air asin.

Rehabilitasi ekosistem pesisir, penanaman mangrove dan vegetasi pantai yang mampu menahan erosi serta memperlambat pergerakan air laut ke daratan.



Sumur Injeksi Managed Aquifer Recharge (MAR) (Sumber: Interstate Technology & Regulatory Council, Injection Well Fact Sheet (FS3) – Managed Aquifer Recharge)



Ilustrasi strategi pengendalian intrusi air laut pada akuifer pesisir melalui penerapan *barrier* fisik dan hidrolis. Diagram menunjukkan pergerakan air asin dari laut ke daratan, serta mekanisme pengendalian dengan sumur injeksi (*artificial recharge*), *barrier* bawah tanah (*cut-off wall*), dan relokasi sumur pompa (Sumber: Hussain, M.S., Abd-Elhamid, H.F., Javadi, A.A., & Sherif, M.M. (2019), *Management of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: A Review*. Water, 11(12), 2467.)

Pengaturan tata ruang dan kebijakan zonasi, menetapkan batas eksploitasi air tanah, melarang pembangunan industri berat di zona rawan intrusi, dan mengintegrasikan data geologi dalam perencanaan wilayah.

Pemerintah daerah dapat bekerja sama dengan lembaga akademik untuk mengembangkan peta kerentanan intrusi air laut berbasis data geologi dan hidrogeokimia, seperti yang telah dilakukan di Jakarta dan Semarang. Dengan strategi yang sistematis antara ilmu geologi, teknologi hidrogeologi, dan kebijakan lingkungan, intrusi air laut dapat dikendalikan secara berkelanjutan.

Penutup

Sebagai penutup, intrusi air laut bukan sekedar fenomena geologi yang dapat dijelaskan dengan konsep-konsep yang ada. Namun dapat menjadi krisis berlapis yang menyangkut aspek geologi, lingkungan, sosial, dan ekonomi. Kasus nyata di Jakarta dan Semarang menunjukkan bagaimana tekanan urbanisasi, eksploitasi air tanah, serta perubahan iklim mempercepat kerentanan pesisir terhadap intrusi air laut. Dampaknya

tidak hanya menurunkan kualitas air tanah, tetapi juga mengancam keberlanjutan ekosistem, kesehatan masyarakat, dan stabilitas ekonomi lokal.

Namun, ancaman ini bukan berarti tanpa solusi, upaya pengendalian melalui konservasi air tanah, penerapan *recharge* buatan, pembangunan sumur pantau, *barrier* hidrolik, hingga rehabilitasi ekosistem pesisir adalah langkah nyata yang dapat dilakukan. Lebih dari itu, keberhasilan pengendalian intrusi air laut bergantung pada kesadaran bersama bagaimana masyarakat, pemerintah, dan akademisi mampu bekerja sama menjaga keseimbangan antara kebutuhan manusia dan sistem geologi pesisir yang rapuh. Dengan pendekatan sistematis dan berkelanjutan, intrusi air laut dapat dikendalikan, sehingga pesisir tetap menjadi ruang hidup yang produktif dan lestari bagi generasi mendatang.

Penulis:
Mahasiswa Teknologi Geologi,
Angkatan 2025



Pengambilan data ASD pada tiap interval satu meter

Aplikasi Analytical Spectral Devices (ASD): Identifikasi Mineral Alterasi

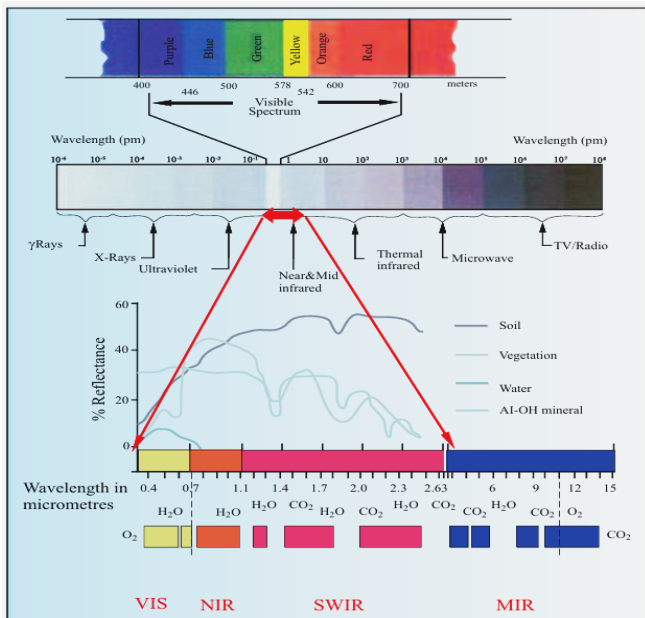
Oleh: Putri Rindu Bunga Kasih

Pada eksplorasi endapan hidrotermal, pemahaman tentang jenis mineral alterasi dan penyebarannya, dari berbagai asosiasi mineral ubahan di lapangan merupakan aspek yang penting. Di lapangan, identifikasi mineral alterasi secara visual memiliki keterbatasan dan kendala dalam penentuan jenis mineral, yaitu terutama dalam penentuan jenis mineral lempung.

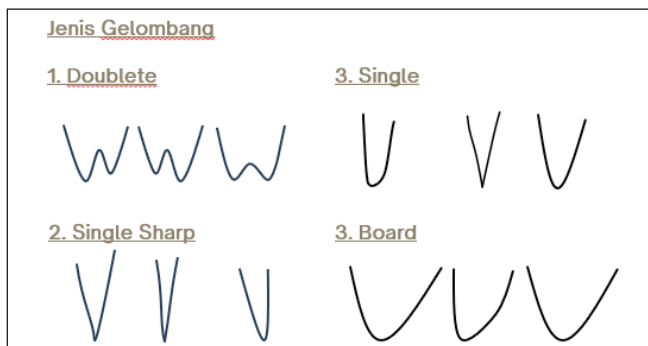
Mineral alterasi lempung berukuran sangat halus, mempunyai karakteristik visual yang mirip, sehingga nyaris tidak bisa dibedakan. Metode *Analytical Spectral Devices (ASD)* menjadi jalan keluar. ASD telah banyak digunakan di industri pertambangan endapan hidrotermal, terutama pada tahap eksplorasi.

Sejak tahun 1990-an, teknologi ASD telah

diperkenalkan sebagai instrumen spektrometer UV/Vis/NIR yang memiliki performa luar biasa dengan kualitas setara peralatan laboratorium yang disertai perangkat lunak pendukung. ASD - TerraSpec dibuat khusus untuk analisis batuan dan tanah di lapangan. TerraSpec alat ideal untuk analisis berbagai jenis tipe endapan, seperti tipe endapan epitermal dan tipe porfiri. TerraSpec berupa perangkat *portable* yang



Spektrum elektromagnetik yang menunjukkan nilai panjang gelombang SWIR dan VNIR (Hauff, 2005 dalam Kasim, 2024).



Pola bentuk gelombang VIS/NIR/SWIR

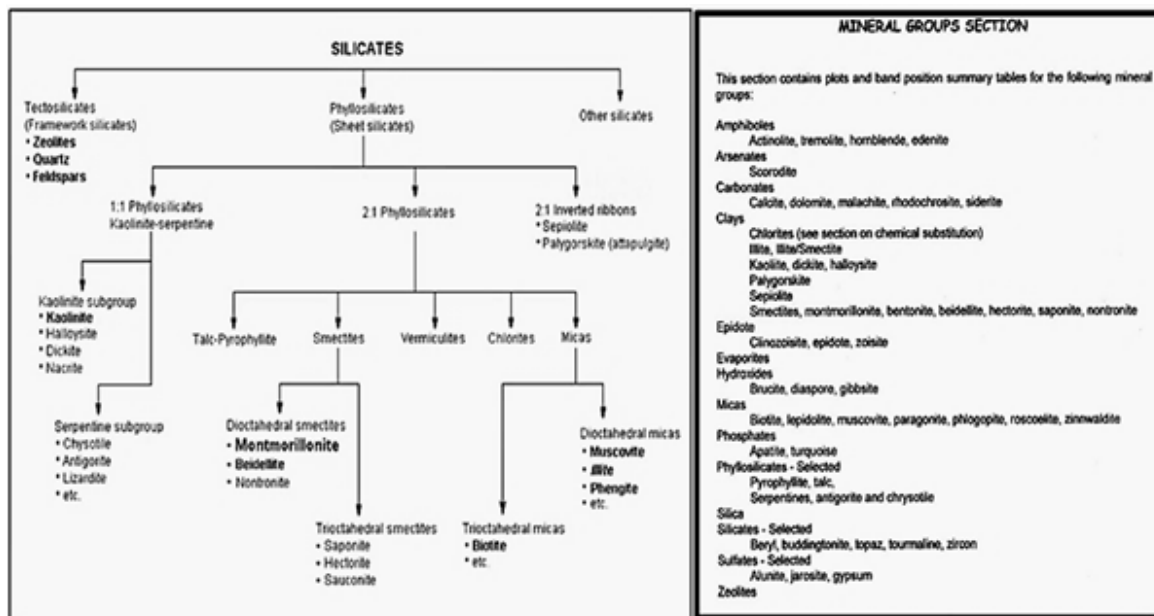
cukup presisi, kompak, dan dapat dibawa ke lapangan. Perangkat ini memiliki jangkauan spektral 350-2500 nm, resolusi spektral 5nm, dan kecepatan pengumpulan data yang tinggi (1/10 per detik per spektrum).

Prinsip analisis spektrum mineral terletak pada identifikasi pola dan panjang gelombang spesifik, yang mencerminkan karakteristik unik setiap mineral. Pola spektral ini dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu: komposisi kimia, orientasi kristal, dan tingkat kristalisasi mineral tersebut. Setiap mineral memiliki spektrum khas yang dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan komposisi dari suatu asosiasi mineral.

Pada aplikasi untuk material geologi, rentang panjang gelombang yang paling umum digunakan untuk membedakan spektrum mineral, terdiri dari *Visible and Near Infrared (VNIR)* dan *Short Wavelength Infrared (SWIR)*. Teknologi SWIR mampu mendeteksi ikatan molekul yang mengandung ion-ion seperti: OH, CO₃, FeOH, AlOH, MgOH, dan H₂O. Mineral-mineral yang memiliki ikatan dengan unsur-unsur tersebut seperti muskovit KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂, alunite KAl₃(SO₄)₂(OH)₆, dan diaspor AlO(OH).

Identifikasi mineral pada setiap gelombang VIS/NIR/SWIR (Hauff, 2008)

VIS (Visible) – NIR (Near Infrared) Identifiable Minerals 400nm – 1300nm	SWIR Suitable Minerals Identification 1300nm – 2500nm
☐ Fe, Cu and Mn minerals ☐ Iron oxide minerals (Goethite, Hematite: Ferric feature) ☐ Pyroxene, Amphibole, Olivine ☐ Hydroxylated silicates with Fe, such Chlorite, Biotite, Epidote ☐ Sulfates, Jarosite ☐ Iron carbonates ☐ Cu in Cu-oxides, silicates and carbonates (e.g. Malachite) ☐ Mn features in Mn minerals	☐ Clays and Micas (i.e. kaolinite, illite, pyrophyllite, biotite) ☐ Phyllosilicates (i.e talc, serpentine) ☐ Hydroxylated silicates (i.e epidote, amphibole) ☐ Sulphates (i.e. alunite, jarosite) ☐ Carbonates (i.e. calcite, ankerite, siderite, magnesite) ☐ Ammonium bearing minerals (i.e buddingtonite, NH ₄ illite)



Klasifikasi mineral lempung, Brindley, 1952 (kiri) dan bagian grup mineral (kanan)

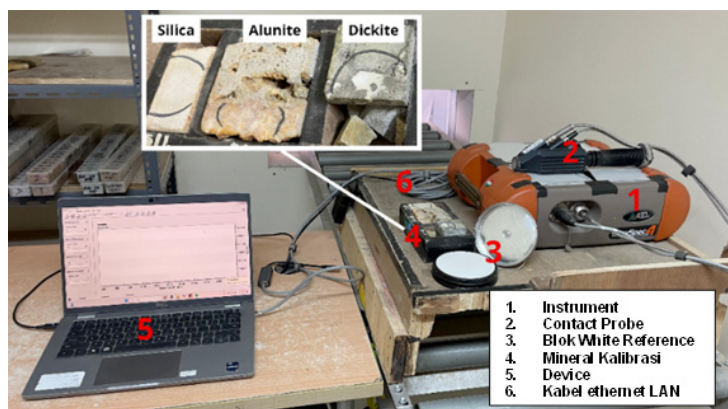
Prosedur Pengujian

Prosedur dalam melakukan pengambilan data ASD adalah sebagai berikut:

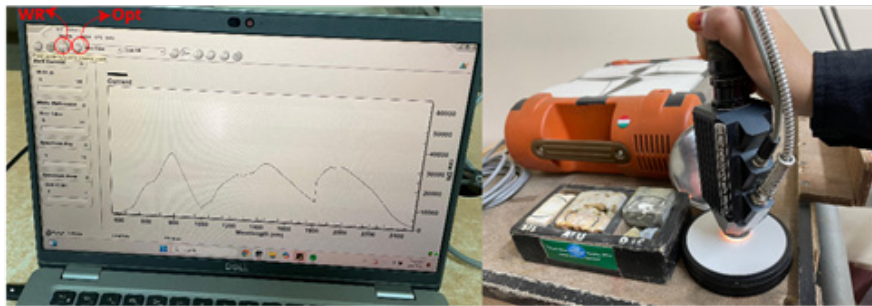
1. Mempersiapkan seperangkat peralatan ASD *portable* (tipe *TerraSpec-4 High Resolution*). Pastikan kabel *fiber optic*, kabel *power supply*, kabel DC, kabel ethernet LAN dari mesin ASD (*TerraSpec*) ke komputer terpasang dengan baik.
2. Tekan saklar daya di bagian belakang perangkat *TerraSpec* untuk menghidupkan perangkat sebelum dapat

digunakan. Hidupkan komputer yang telah dilengkapi dengan *software RS3 high contrast* apabila pengukuran dilakukan di luar ruangan dan apabila di dalam ruangan menggunakan RS3.

3. Lakukan kalibrasi setiap akan menggunakan alat *TerraSpec*. Kalibrasi dilakukan dua kali. Pertama kalibrasi dengan blok putih, lakukan optimasi (Opt) untuk mengoptimalkan pengumpulan arus gelap selama pengukuran nanti. Lalu lakukan kalibrasi *white reference* (WR) untuk standarisasi pengukuran yang dilakukan. Kedua kalibrasi dengan mineral (alunit, dickit, silika) untuk memastikan bahwa panjang gelombang yang dibaca setiap mineral tersebut



Seperangkat peralatan Analytical Spectral Device (ASD) dan kalibrasi



Kalibrasi alat TerraSpec dengan blok putih, silika, alunit, dikit

benar. Kalibrasi alat Opt dan WR dilakukan setiap 20 menit, sedangkan untuk kalibrasi dengan mineral (alunit, dickit, silika) dilakukan setiap 1 jam.

4. Sebelum melakukan pengambilan data ASD pada sampel inti bor, pastikan sampel dalam keadaan kering dan dingin. Apabila sampel dalam kondisi basah akan mempengaruhi pembacaan dan menghasilkan panjang gelombang berbeda. Sampel yang kondisinya basah dikeringkan pada oven dengan suhu 60°C selama 12 jam sesuai SOP. Setelah sampel dikeluarkan dari oven, pastikan lagi dalam kondisi dingin dan kering untuk siap dilakukan pengambilan data ASD.
5. Buat folder di komputer untuk menyimpan hasil pada setiap pengukuran.
6. Pengambilan data dilakukan setiap interval 1 meter pada sampel yang permukaannya rata dan hindari garis orientasi inti bor

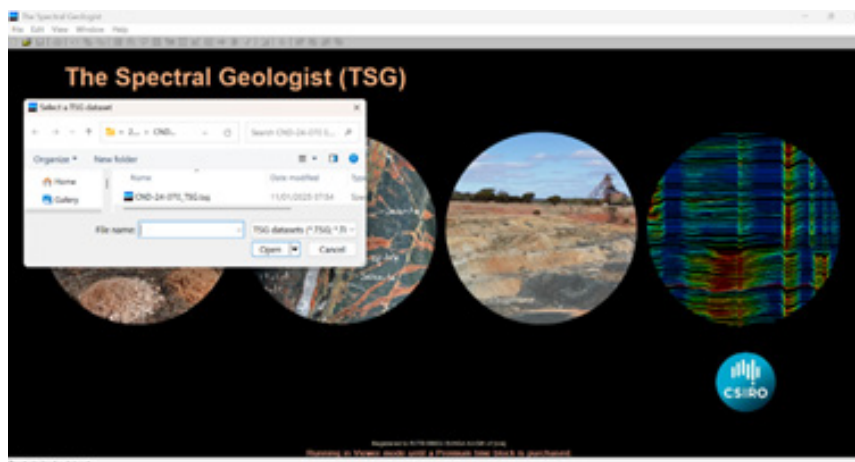
untuk menghindari kesalahan pembacaan. Simpan *spectrum* dengan *path name* dengan *hole_ID*, *basename* dengan interval meter pengukuran, *starting spectrum num* dengan urutan penembakan dari 0-E.O.H, *number of files to save* dengan angka 0001.

7. Menghindari kontaminasi atau *salah* pembacaan, lakukan pembersihan kaca *contact probe* dengan kuas atau kertas tisu setiap selesai melakukan pengambilan data.
8. Setelah dilakukan pengukuran data ASD pada sampel inti bor, *spectrum quality control* dilakukan oleh *geologist* ahli *spectral*, memastikan bahwa hasil *scan spectrum* sesuai standar.

Prosedur Analisis

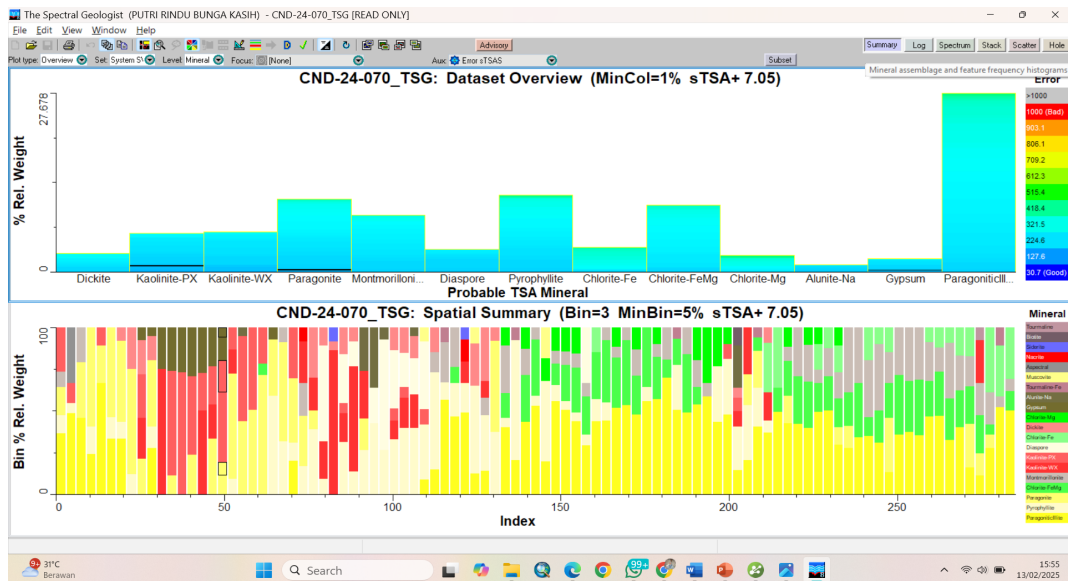
Prosedur analisis ASD adalah sebagai berikut:

1. Buka Software *The Spectral Geologist 8* (TSG 8), masuk dan pilih data set (.tsg) setiap lubang bor.

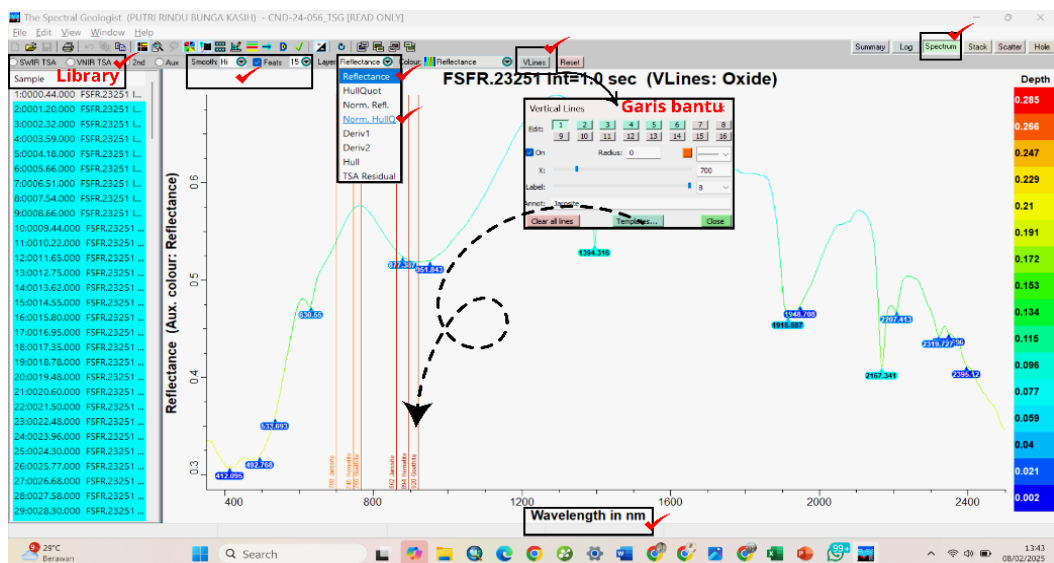


Gambar 7. Software The Spectral Geologist 8

2. *Software* TSG 8 memiliki kemampuan mengidentifikasi tiga mineral utama pada setiap titik pengukuran probe di permukaan batuan. Hasil analisis ditampilkan dalam tiga format, yang terdiri atas catatan analisis (log), pola spektrum, dan ringkasan data dari satu lubang bor.
3. Analisis pembacaan *spectrum* dengan menggunakan *software The Spectral Geologist 8 (TSG 8)*. Selain menganalisis panjang gelombang (*wavelength*) yang menunjukkan keterdapatn mineral tertentu, sekaligus melakukan pengecekan yang berupa *noisy spectrum*, *very low wavelength*, *aspectral*, *contain water/wet*.



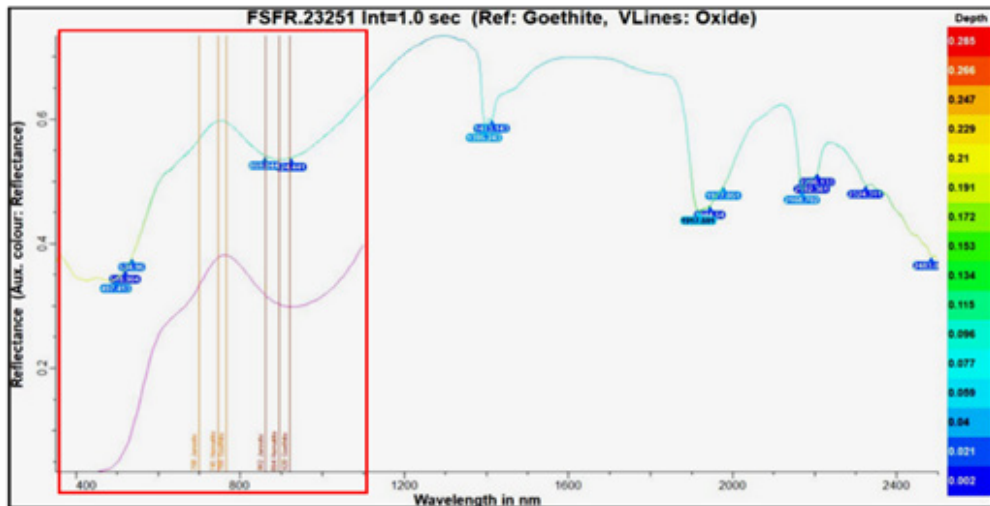
Ringkasan pembacaan mineral dalam satu lubang bor



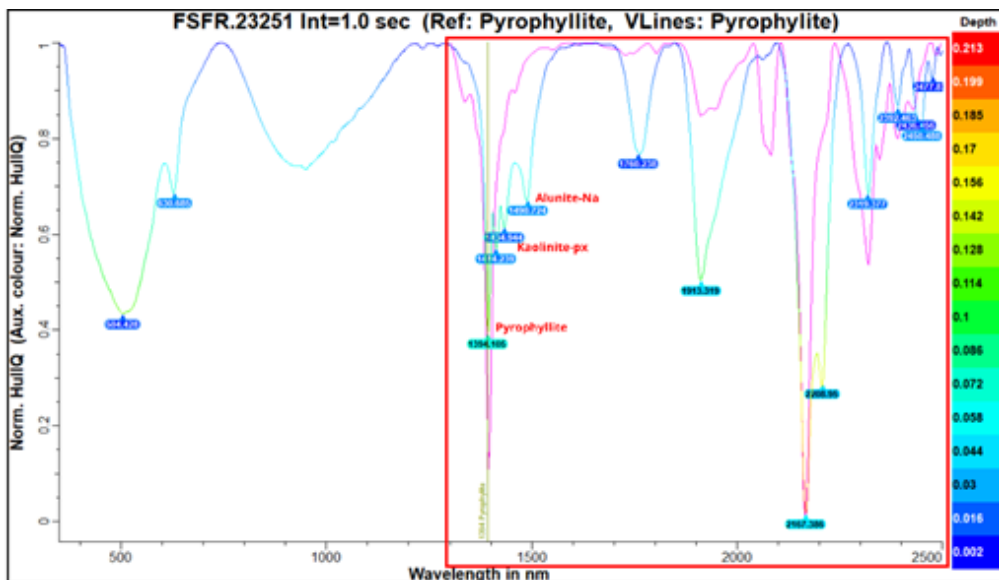
Penggunaan *software The Spectral Geologist 8 (TSG 8)*.

4. Dalam menganalisis mineral *oxide* dengan melihat layer Spectrum "Reflectance" dari gelombang VNIR (Visible Near Infra-Red) dengan panjang gelombang (350-1100 nm), lihat pada panjang gelombang puncak dan lembah. Sedangkan pembacaan mineral *clays, micas, phyllosilicates*,

hydroxylated silicates, sulphates, carbonates, dst dengan melihat layer Spectrum "Norm, HullQ" dari gelombang SWIR (Short Wave Infra-Red) dengan panjang gelombang (1100-2500 nm), lihat pada panjang gelombang lembah.



Analisis mineral oksida pada panjang gelombang (350-1100 nm)

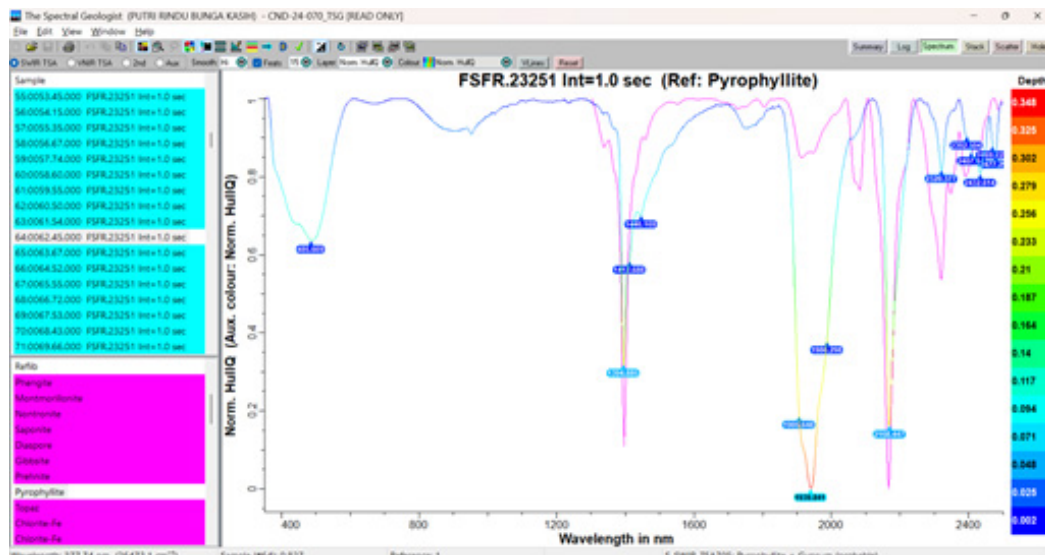


Analisis mineral lempung, *micas, phyllosilicates, hydroxylated silicates, sulphates, carbonates* pada panjang gelombang (1100-2500 nm)

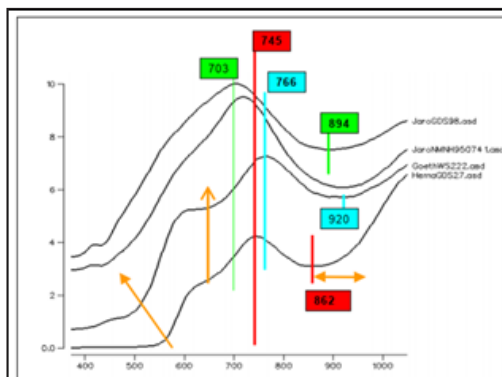
- Perhatikan dan lihat dengan teliti panjang gelombang, apabila kesulitan membaca lembah, dapat dengan bantuan memunculkan tools "feed" dan aktifkan *high smooth*, serta "vertical lines" dengan nilai gelombang mineral tertentu. Karena setiap mineral memiliki nilai rentang panjang gelombang dan bentuk (*board, single, doublets, dst*) yang berbeda. Gunakan fitur "Spectral Assistant" untuk deteksi mineral awal dan validasi dengan *library* spektral standar mineral.
- Untuk memastikan keakuratan hasil, bentuk spektrum diperiksa menggunakan dua metode. Pertama, dengan membandingkan terhadap kamus spektral yang terdapat dalam aplikasi. Kedua, dengan mengamati

garis vertikal yang menunjukkan nilai panjang gelombang khas setiap mineral.

- Hasil analisis pada sampel inti bor diinput ke dalam excel (.csv) dengan identitas *hole_ID*, interval pengukuran (m), mineral oksida, mineral lempung dan mika untuk memudahkan proses pengolahan data, pada setiap interval sampel urutkan berdasarkan mineral yang dominan.
- Cross-check* dengan data foto inti bor & hasil deskripsi, kemudian validasi & review interpretasi bersama *geologist*.
- Data hasil *picking* diolah dengan membuat grup dan menyederhanakan menggunakan excel sehingga menjadi *assemblage* mineral alterasi dan simpan dalam bentuk csv.

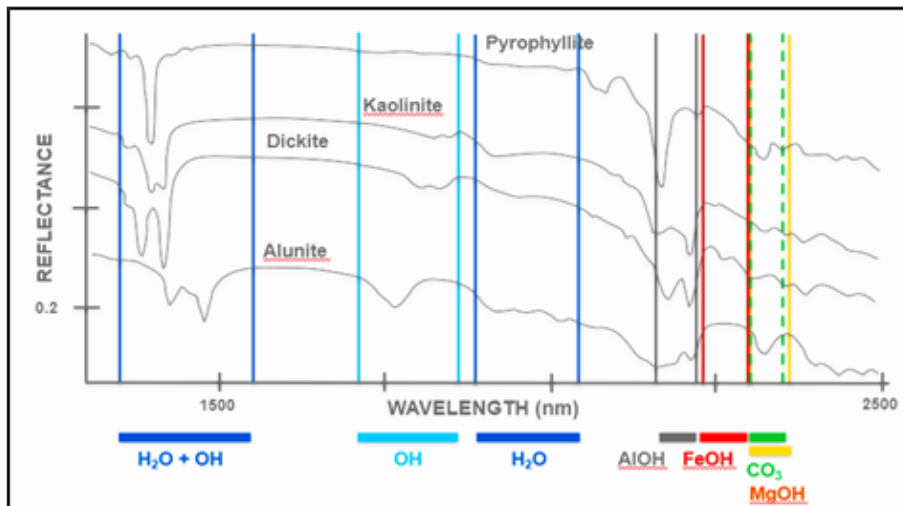


Pemeriksaan analisis dengan kamus spektral pada SWIR TSA



- ☐ **Hematite** : Main feature at near 862 nm, peak at 766nm
- ☐ **Goethite** : Main feature at 920nm, with feature at 650nm. And peak feature at 766nm
- ☐ **Jarosite** : Main feature at 894 nm, peak at 703nm

Pola dan panjang gelombang mineral oksida



Pola dan panjang gelombang mineral alunite, dickit, kaolinit, dan pirofilit

	1.4 μ H ₂ O + OH	2.2 μ Al-OH	2.3 μ Fe-OH, Mg-OH CO ₃
D O U B L E S	Alunite 1.425-1.439 1.478-1.495 Azurite 1.497 Dickite 1.378-1.386 1.414-1.418 Kaolinite 1.392-1.402 1.410-1.418 Zunyite 1.557 +/- Gypsum 1.445-1.450 Jarosite 1.466-1.478	Alunite 2.168-2.173 2.205-2.208 Dickite 2.180-2.186 2.206-2.214 Kaolinite 2.162-2.168 2.205-2.214 Zunyite 2.135-2.138	Amphiboles 2.294-2.328 2.312-2.390 Azurite 2.349-2.351 Bio/Phlogo 2.322-2.348 Hydrocarbons 2.299-2.313 2.349-2.551 Malachite 2.266 2.353-2.355 Talc 2.286-2.294 2.308-2.314
S H A R P	Al-Micas 1.410-1.414 Illite 1.408-1.414 Pyrophyllite 1.392-1.396 Scorodite 1.452 +/- Talc 1.390-1.398 Topaz 1.405-1.408	Al-Micas 2.194-2.220 Illite 2.190-2.220 Pyrophyllite 2.166-2.168 Topaz 2.086-2.088	Jarosite 2.267-2.271 Tourmaline 2.364-2.366
B R O A D	Illite/Smectite 1.404-1.415 nd Quartz 1.443-1.447 Silica 1.420-1.426 Smectite 1.406-1.418nd	Diaspore 2.176-2.220 Illite/Smectite 2.188-2.192 Montmorillonite 2.208-2.214 Silica 2.236-2.250	Carbonates 2.319-2.364 Chlorites 2.242-2.262 2.314-2.368 Epidote 2.338-2.346 Nontronite 2.284-2.294 Serpentines 2.314-2.336 Silica 2.240-2.252
V I S	Goethite 0.766, 0.920 +/- Hematite 0.745, 0.0862 +/- Jarosite 0.700, 0.894 +/- Pyroxenes 0.914-1.053		

SWIR common minerals – diagnostic features (Spectral International INC)

Keunggulan

Keunggulan identifikasi mineral alterasi menggunakan ASD antara lain, preparasi sampel minimal. Efektif untuk identifikasi mineral lempung kristal halus, menganalisis banyak sampel dalam waktu singkat, biaya rendah, membedakan mineral yang secara visual hampir sama, integrasi data yang mudah, analisis dan pengambilan data dapat dilakukan

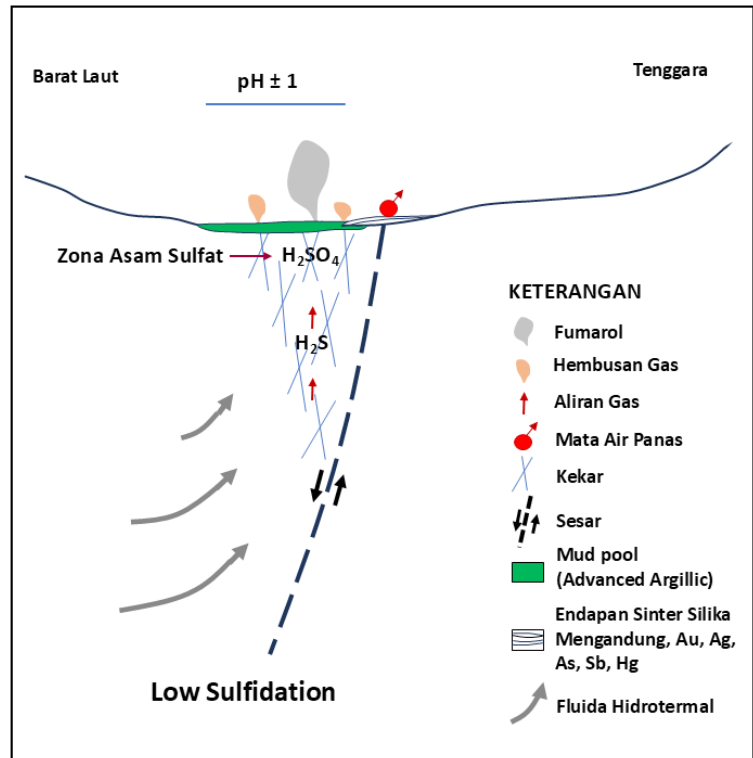
di lapangan, non-destruktif, dan menghasilkan data kuantitatif. Kegiatan eksplorasi dengan dukungan data ASD, dapat diperoleh hasil interpretasi lebih cepat, sehingga keputusan untuk menentukan langkah eksplorasi lebih lanjut dapat segera dilakukan.

Penulis: Alumna Mahasiswi Teknologi Geologi, Angkatan 2022, PEP Bandung

Unsur Penunjuk (*pathfinder elements*) Indikator Mineralisasi Emas

Oleh: Siti Mutiara Cahyani

Di dunia eksplorasi mineral, terutama emas, sering dihadapkan pada sebuah paradoks, yaitu: mencari sesuatu yang hampir tidak bisa dilihat dengan mata telanjang. Emas (Au), meskipun bernilai tinggi, sering hadir dalam konsentrasi yang sangat kecil dalam sistem alami, yakni dalam fluida hidrotermal yang membawanya sekalipun.



Model konseptual sistem epitermal di Kawah Kamojang, Garut, dan *pathfinder elements* pada endapan sinter silika (Suprpto, dkk., 2025)

Fluida hidrotermal merupakan zat yang dapat mengalir dan berubah secara terus menerus saat terkena gangguan sekecil apapun baik perubahan seperti temperatur, pH, maupun tekanan. Di dalam hidrotermal terdapat fasa cair, gas, maupun padatan. Fluida tidak memiliki bentuk tetap, melainkan menyesuaikan dengan bentuk yang mewadahnya, memiliki *viskositas* atau kekentalan, dan dapat mentransmisikan tekanan.

Menurut Jeffrey W. Hedenquist dan rekan-rekannya dalam buku *Exploration for Epithermal Gold Deposits*, dalam sistem hidrotermal, emas umumnya hadir dalam konsentrasi sangat rendah di dalam fluida, sehingga sulit untuk mendeteksi langsung saat tahap awal eksplorasi. Oleh karena itu, pendekatan berbasis indikator geokimia menjadi sangat penting, dan disinilah *pathfinder elements* mengambil peran.



Penelitian zonasi alterasi pada sistem epitermal di Kawah Kamojang, Garut, Jawa Barat, oleh Tim dari Teknologi Geologi, PEP Bandung, tahun 2025.

Mengenal *Pathfinder Elements*

Pathfinder elements atau unsur penunjuk adalah unsur-unsur yang memiliki asosiasi geokimia dengan mineralisasi tertentu dan digunakan sebagai indikator keberadaan endapan logam. Dengan kata lain, unsur ini mudah bergerak yang berasosiasi erat dengan bijih target (logam berharga) dan lebih mudah dideteksi karena membentuk "halo" atau lingkaran persebaran yang lebih luas. Unsur ini membantu geolog menemukan endapan mineral bijih utama.

Emas sendiri sangat sulit dideteksi secara langsung karena kadarnya sangat kecil (ppm bahkan ppb), tidak selalu muncul di permukaan, dan sering tersebar secara tidak merata. Oleh karena itulah dalam eksplorasi emas, biasanya unsur-unsur seperti arsen (As), antimon (Sb), merkuri (Hg), perak (Ag), tembaga (Cu), timbal (Pb), dan seng (Zn) yang paling sering digunakan karena memiliki karakteristik mobilitasnya lebih tinggi daripada logam utamanya, sehingga persebarannya lebih luas (halo) di batuan, tanah, atau sedimen.

Pathfinder ini penting karena bisa menghemat waktu dan biaya eksplorasi dengan memperkecil target area pencarian ke zona yang memiliki anomali *pathfinder*. Namun perlu ditegaskan bahwa *pathfinder elements* tidak dijadikan sebagai jaminan adanya emas. Hal tersebut hanya menunjukkan bahwa kondisi geologi dan geokimia yang mendukung mineralisasi pernah terjadi di area tersebut.

Fluida Hidrotermal: Pembawa Logam dari Kedalaman

Fluida panas bumi merupakan media utama transportasi logam dalam sistem hidrotermal. Fluida ini terbentuk dari kombinasi air meteoritik dan komponen magmatik, yang bereaksi dengan batuan reservoir pada temperatur tinggi.

Menurut Robert O. Fournier dalam buku *The Behavior of Silica in Hydrothermal Solutions*, emas dalam fluida hidrotermal umumnya diangkut dalam bentuk kompleks kimia, terutama kompleks bisulfida ($\text{Au}(\text{HS})_2^-$), yang

stabil pada kondisi temperatur menengah dan lingkungan reduksi. Fournier juga menekankan bahwa fluida hidrotermal, yang sering kali berasal dari campuran fluida magmatik dan air meteorik, memainkan peran kunci dalam pengangkutan dan pengendapan emas. Emas umumnya diangkut sebagai kompleks dalam larutan panas tersebut, yang kemudian terendapkan akibat perubahan fisika-kimia, seperti penurunan suhu atau tekanan.

Sementara itu, Franco Pirajno menjelaskan bahwa unsur-unsur seperti arsen dan antimon memiliki afinitas yang kuat terhadap sistem epitermal dan sering muncul sebagai bagian dari asosiasi mineralisasi sulfida. Perubahan kondisi fisikokimia seperti *boiling* (pendidihan fluida), *mixing* dengan air meteorik, dan perubahan pH dan redoks akan menyebabkan destabilitas kompleks logam dan memicu pengendapan mineral, termasuk emas.

Membaca Pola Tersembunyi dari Distribusi *Pathfinder Elements*

Distribusi *pathfinder elements* dalam sistem hidrotermal tidak terjadi secara acak, melainkan mengikuti pola tertentu yang dikontrol oleh kondisi fisikokimia fluida, seperti suhu, tekanan, pH, dan kondisi redoks. Saat fluida hidrotermal bergerak dari kedalaman menuju permukaan, terjadi perubahan kondisi yang menyebabkan unsur-unsur kimia terdistribusi secara bertahap. Proses ini menghasilkan pola sebaran unsur yang dikenal sebagai zonasi geokimia.

Menurut Noel C. White, sistem epitermal menunjukkan zonasi vertikal yang khas, di mana unsur seperti Hg dominan di bagian dangkal, sementara As

dan Sb muncul pada zona transisi, dan logam dasar seperti Cu, Pb, dan Zn lebih dominan di bagian dalam. Zonasi ini membentuk apa yang dikenal sebagai *geochemical halo*, yang sering kali lebih luas dibandingkan zona mineralisasi emas itu sendiri. *Geochemical halo* sendiri memiliki ciri-ciri sebagai berikut:

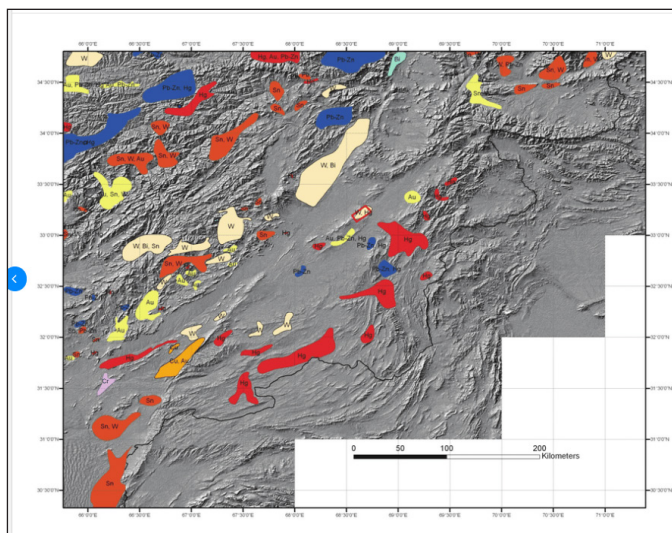
- ukurannya lebih luas dibandingkan zona emas
- dapat terdeteksi lebih awal dalam eksplorasi
- membantu menentukan arah dan pusat sistem hidrotermal

Hasil penelitian dari Stephen G. Peters and Bernard H. Hubbard di Cekungan Katawaz di Afghanistan. Dalam penelitian tersebut bisa dilihat contoh dari zonasi *Geochemical Halo*, dimana warna merah menunjukkan keberadaan Merkuri, warna biru menunjukkan keberadaan Tembaga, Timbal, dan Seng yang mengelilingi warna kuning (Emas) yang berada di tengah.

Dengan membaca halo ini, ahli geologi bisa memperkirakan lokasi pusat mineralisasi, arah aliran fluida, dan kedalaman sistem. Hal ini menjadikan *pathfinder elements* sebagai alat penting dalam pemetaan awal sistem hidrotermal.

Distribusi *pathfinder elements* sesuai zona kedalaman, pada sistem hidrotermal

Zona	Dominasi Unsur	Karakteristik	Keterangan
Dangkal	Merkuri (Hg)	▪ suhu relatif rendah ▪ sering dalam bentuk uap atau gas ▪ berkaitan dengan aktivitas fumarol atau solfatara	Hg menjadi indikator sistem hidrotermal bagian atas
Menengah	Arsen (As) dan Antimon (Sb)	▪ kondisi transisi antara zona dalam dan dangkal ▪ sering berkaitan dengan mineralisasi epitermal ▪ mulai terjadi pengendapan logam	Zona ini sering dianggap paling prospektif untuk emas
Dalam	Tembaga (Cu), Timbal (Pb), Seng (Zn)	▪ suhu dan tekanan tinggi ▪ dekat dengan sumber fluida magmatik ▪ sering terkait sistem porfiri	Menunjukkan kedekatan dengan sumber mineralisasi



Geochemical Halo dalam Penelitian Stephen G. Peters and Bernard H. Hubbard di Cekungan Katawaz di Afghanistan.

Faktor yang Mempengaruhi Distribusi Pathfinder

Distribusi *pathfinder elements* dipengaruhi oleh beberapa faktor utama:

1. **Suhu**, Semakin tinggi suhu, semakin besar kemampuan fluida melarutkan logam.
2. **pH (keasaman)**, Fluida asam cenderung melarutkan lebih banyak logam dibandingkan fluida netral.
3. **Kondisi Redoks**, Menentukan bentuk kimia unsur (teroksidasi atau tereduksi).
4. **Proses Boiling**, Pendidihan fluida menyebabkan perubahan tekanan dan memicu pengendapan logam.
5. **Mixing Fluida**, Pencampuran dengan air meteorik dapat mengubah kestabilan kompleks logam.

Pathfinder Elements dan Kondisi Geologi Jawa Barat

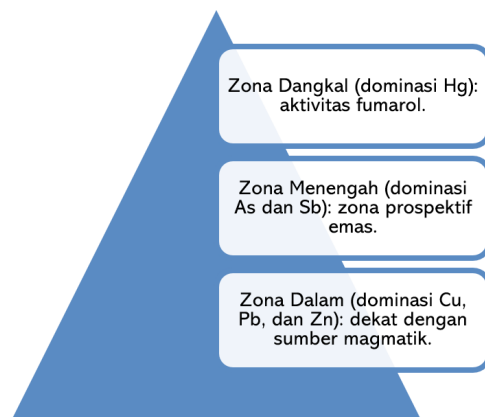
Wilayah Jawa Barat merupakan bagian dari busur vulkanik aktif Indonesia yang terbentuk akibat subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia. Aktivitas tektonik ini menghasilkan gunung api aktif, intrusi magmatik, sistem panas bumi, dan serta sistem hidrotermal yang berkembang luas. Kondisi ini menjadikan Jawa Barat sebagai lingkungan yang ideal untuk terbentuknya endapan mineral hidrotermal, termasuk emas tipe epitermal dan porfiri.

Jawa Barat sendiri memiliki banyak sistem panas bumi seperti Kamojang, Wayang Windu, dan Patuha yang menunjukkan manifestasi hidrotermal yang kuat seperti fumarol, mata air panas, dan endapan silika. Fluida dari manifestasi ini mengandung berbagai unsur terlarut, termasuk *pathfinder elements* seperti Hg, As, dan Sb. Kondisi fluida yang asam dan kaya sulfur di beberapa lokasi menunjukkan kemiripan dengan sistem *epitermal high sulfidation*.

Untuk distribusi *pathfinder elements* di Jawa Barat mengikuti pola zonasi hidrotermal. Meskipun demikian, keberadaan unsur-unsur ini tidak selalu berarti adanya mineralisasi emas ekonomis. Interpretasi harus dilakukan secara terpadu dengan data geologi dan struktur.

Studi Kasus Pathfinder Elements di Indonesia

Penelitian tentang *Pathfinder Elements* di Indonesia sudah dilakukan di beberapa daerah, di antaranya yaitu di Pongkor, Tujuh Bukit, Kamojang, dan Batu Hijau. Keberadaan unsur-unsur penunjuk tersebut sangat penting perannya dalam eksplorasi, yakni dapat menuntun menuju zona mineralisasi



Ilustrasi distribusi *pathfinder elements* di Jawa Barat

atau zona terbentuknya endapan emas.

Implikasi Eksplorasi

Penggunaan *pathfinder elements* memungkinkan eksplorasi yang lebih efisien dan terarah. Analisis geokimia fluida dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona prospek tanpa pengeboran awal yang mahal.

Dari ringkasan di atas, bisa disimpulkan bahwa *pathfinder elements* bermanfaat untuk:

- membantu identifikasi daerah prospek tanpa pengeboran awal.
 - memetakan sistem hidrotermal secara tidak langsung.
 - meningkatkan efisiensi eksplorasi.
- Namun, interpretasi tetap harus hati-hati karena:
- tidak semua anomali menunjukkan adanya emas
 - distribusi unsur dapat dipengaruhi proses sekunder

Penutup

Pathfinder elements merupakan unsur-unsur kimia yang berperan sebagai indikator dalam mengidentifikasi potensi mineralisasi, khususnya emas, dalam sistem hidrotermal. Unsur-unsur seperti arsen (As), antimon (Sb), merkuri (Hg), serta logam dasar seperti tembaga (Cu), timbal (Pb), dan seng (Zn) memiliki hubungan geokimia yang erat dengan proses pembentukan endapan mineral.

Dalam sistem panas bumi, *pathfinder elements* diangkut oleh fluida hidrotermal dari kedalaman menuju permukaan. Perubahan kondisi fisikokimia fluida, seperti suhu,

Unsur penunjuk di beberapa lokasi endapan emas

No.	Lokasi	<i>Pathfinder</i> dominan	Interpretasi	Keterangan
1.	Pongkor (Jawa Barat)	• Arsen (As) • Antimon (Sb) • Merkuri (Hg) • Perak (Ag)	Distribusi unsur-unsur ini menunjukkan pola zonasi: • Hg, zona dangkal • As dan Sb, zona mineralisasi utama • Ag, berasosiasi langsung dengan emas	Anomali As dan Sb sering digunakan untuk menentukan zona target pengeboran.
2.	Tujuh Bukit (Jawa Timur)	• Merkuri (Hg) • Arsen (As) • Antimon (Sb) • Tembaga (Cu)	• Hg, menunjukkan zona dangkal dan aktivitas uap • As dan Sb, zona prospektif emas • Cu, indikasi keterkaitan dengan sistem porfiri di kedalaman dan tipe <i>high sulfidation</i>.	kombinasi <i>pathfinder</i> bisa mengindikasikan sistem bertingkat (epitermal + porfiri).
3.	Kamojang (Jawa Barat)	• Merkuri (Hg) • Arsen (As) • Antimon (Sb)	• Hg tinggi, aktivitas uap dangkal • As dan Sb, menunjukkan adanya sistem hidrotermal aktif	indikasi kemiripan dengan sistem epitermal
4.	Tambang Batu Hijau (Nusa Tenggara Barat)	• Tembaga (Cu) • Molibdenum (Mo) • Emas (Au, minor) • Seng (Zn)	• Cu dan Mo, indikator utama sistem porfiri • Zn dan Pb, zona perifer • zonasi menunjukkan arah ke pusat intrusi	<i>pathfinder</i> membantu menentukan posisi pusat mineralisasi dan arah eksplorasi.

tekanan, dan pH, menyebabkan unsur-unsur tersebut terdistribusi dan membentuk pola zonasi geokimia yang khas. Pola ini dapat dimanfaatkan untuk memahami posisi relatif terhadap pusat mineralisasi.

Keberadaan *pathfinder elements* sangat penting dalam kegiatan eksplorasi karena dapat membantu mengidentifikasi daerah prospek secara lebih efisien tanpa harus langsung melakukan pengeboran. Namun demikian, kehadiran unsur-unsur ini tidak selalu menunjukkan adanya mineralisasi emas yang ekonomis, sehingga interpretasinya perlu dikombinasikan dengan data geologi dan metode eksplorasi lainnya. Dengan demikian, *pathfinder elements* dapat dianggap sebagai alat bantu yang efektif dalam eksplorasi mineral, sekaligus sebagai kunci untuk memahami sistem hidrotermal yang berkembang di suatu wilayah.

Penulis: Mahasiswi Teknologi Geologi, Angkatan Tahun 2025

Sidik Jari Mineral Melalui XRD: Memecahkan Kompleksitas Alterasi Hidrotermal

Oleh: Putri Rindu Bunga Kasih, A.Md

X-ray diffraction (XRD) merupakan teknik analisis instrumental yang sangat powerful untuk karakterisasi, teknik non destruktif ini dirancang untuk mengidentifikasi fase kristal dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel dalam material.

Metode ini bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X. Ketika sinar-X elektron berkecepatan tinggi dengan panjang gelombang tertentu ditembakkan ke sampel kristal, sinar tersebut akan dipantulkan oleh bidang-bidang atom dalam struktur kristal dan menghasilkan pola difraksi yang unik.

Pola tersebut terekam sebagai intensitas sinar yang terdifraksi pada sudut-sudut tertentu, menghasilkan difraktogram yang menjadi "sidik jari" khas dari setiap mineral. Sudut ini dianalisa dengan memunculkan puncak-puncak kurva yang spesifik.

Identifikasi mineral menggunakan XRD tidak hanya menentukan jenis mineral yang hadir, tetapi juga mengukur proporsi atau persentase setiap fase mineral dalam sampel. Analisis sampel menggunakan X-RD MAXima dengan komponen *source* dan *detector*. *Source* memancarkan sinar-X pada sudut 4° hingga 80° . *Detector* menangkap pantulan sinar-X dari sampel. Intensitas pantulan yang diterima *detector* menghasilkan puncak-puncak (*peak*) karakteristik.

Jenis - Jenis XRD

Terdapat dua jenis XRD yang umum digunakan untuk mengungkap mineral yang terkandung dalam mineral, yaitu XRD kualitatif



X-RD MAXima dengan komponen source dan detector

dan kuantitatif. XRD kualitatif bertujuan untuk mengidentifikasi jenis mineral apa saja yang hadir dalam sampel tanpa menentukan jumlah atau persentasenya. Kelebihannya cepat, murah, langsung mengidentifikasi mineral alterasi kunci, cukup memadai untuk interpretasi zona alterasi, tetapi tidak dapat memberikan informasi proporsi masing-masing mineral penyusun, sulit mendeteksi mineral $<1-3$ wt%, dan tidak dapat mengidentifikasi

mineral amorf.

XRD kuantitatif untuk menentukan persentase berat (wt%) setiap mineral dalam sampel. Informasi kuantitatif ini penting seperti untuk pemodelan eksplorasi, perhitungan *mass balance* dan intensitas alterasi. Kelebihan utama adalah kemampuannya memberikan data numerik presisi tinggi, kekurangan paling signifikan adalah waktu analisis yang jauh lebih lama dibandingkan kualitatif, terutama untuk metode Rietveld yang dapat memakan waktu 1-3 jam per sampel untuk akuisisi data dan *refinement*, serta biaya analisisnya lebih tinggi.

Pemilihan Sampel

Pemilihan sampel untuk analisis XRD didasarkan pada tujuan analisis. Dalam studi alterasi hidrotermal, tidak semua sampel batuan perlu dianalisis dengan XRD, melainkan hanya sampel-sampel kunci yang representatif dan informatif untuk interpretasi sistem hidrotermal, sehingga diperlukan strategi sampling yang sistematis dan terarah untuk memaksimalkan informasi yang diperoleh dengan biaya dan waktu yang efisien. Proses pemilihan sampel ini harus didasarkan pada kombinasi antara observasi lapangan dan pemahaman tentang tujuan eksplorasi atau penelitian yang sedang dilakukan.

Langkah pertama pemilihan sampel dimulai dari observasi lapangan, mengidentifikasi variasi visual dalam intensitas dan tipe alterasi yang terlihat di singkapan, bongkah, atau *core drilling*. Sampel yang wajib diXRD adalah yang mewakili setiap tipe alterasi yang diidentifikasi secara visual di lapangan. Terutama sampel yang banyak mengandung lempung (smektit, illit, kaolinit, dikit, dan montmorillonit), karena mineral lempung seringkali terlihat identik secara megaskopik maupun mikroskopik petrografi. Selain itu sampel dengan kehadiran multiple mineral *assemblages* yang tumpang tindih atau tekstur *replacement*, yang menunjukkan lebih dari satu episode fluida hidrotermal dengan kondisi fisiko-kimia berbeda.

Langkah kedua pilih sampel secara representatif dan informatif dari setiap zona alterasi. Setiap sampel diberi kode (nomor

dan lokasi pengambilan) untuk memudahkan proses preparasi dan mencegah tertukarnya identitas sampel.

Prosedur Preparasi

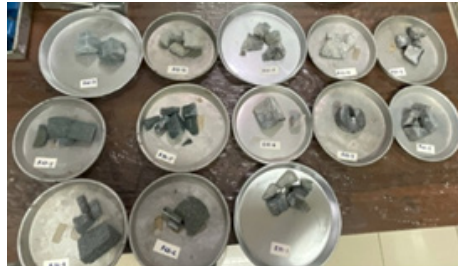
Preparasi XRD merupakan tahap kritis yang sangat menentukan kualitas dan akurasi hasil analisis. Kualitas data difraksi yang dihasilkan sangat bergantung pada bagaimana sampel dipersiapkan, karena preparasi yang tidak tepat dapat menyebabkan artefak, *preferred orientation*, atau bahkan perubahan mineralogi sampel. Secara umum, preparasi XRD bertujuan untuk menghasilkan sampel yang homogen, representatif, memiliki ukuran partikel yang sesuai, dan terdistribusi merata pada sample holder XRD.

Peralatan dan bahan yang dibutuhkan dalam preparasi XRD antara lain *Jaw Crusher*, *Pulverizer Retsch*, ayakan mesh #200, kuas, loyang bulat dan loyang besar, plastik tatakan, plastik sampel sedang dan kecil, spidol permanen, kertas HVS, bolpoin, X-RD MAXima, komputer, kaca preparat, spatula, dan tisu.

Berikut prosedur preparasi sampel menjadi *pulp*.

1. Pemberian ID dan pengeringan sampel: sampel yang akan dipreparasi diberikan identitas sampel pada setiap loyang dan keringkan sampel dalam oven hingga kering dengan suhu 40°C, lama waktu pengovenan tergantung masing-masing kondisi kelembaban sampel.
2. Pemecahan kasar (*crushing*): sampel yang sudah kering dihancurkan menggunakan *Jaw Crusher* menjadi ukuran $\pm 1-2$ cm. Sebelum memasukkan sampel ke mesin *Jaw Crusher*, bersihkan alat *Jaw Crusher* dan loyang terkumpulnya sampel dengan kompresor udara dan kuas untuk menghindari kontaminasi antar sampel, bersihkan setiap pemecahan sampel berbeda.
3. Penghalusan (gerinding) dan pengayakan: gerus sampel menggunakan *Pulverizer Retsch* menjadi ukuran < 100 mesh atau $< 74 \mu\text{m}$ dan ayak sampel hingga diperoleh fraksi butir ~ 200 mesh. Bersihkan alat

Sampel dengan identitas dan pengeringan di suhu 40°C



Pengecilan ukuran sampel dengan Jaw Crusher ukuran (± 1 cm)



Penggerusan dengan Pulverizer Retsch ukuran <100 mesh/<74 μ m dan pengayakan -200 mesh

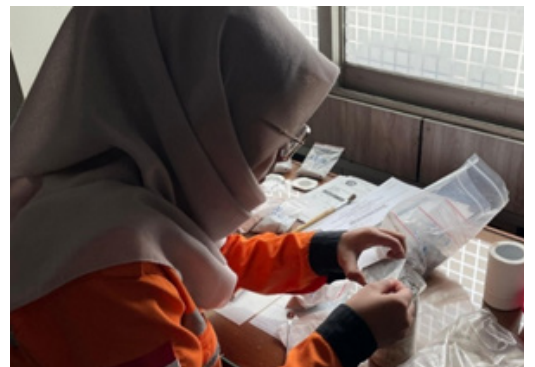


Pulverizer Retsch, saringan mesh, plastik tatakan dengan kompresor udara dan kuas untuk setiap preparasi sampel berbeda.

4. Pengemasan : kemas sampel yang lolos pada saringan mesh 200 ke dalam plastik sampel untuk analisis, berikan identitas sampel pada plastik dan kertas. Sampel yang tertinggal diatas ayakan +200 mesh sebagai duplikat sampel, berikan ID sampel dan sampel siap di *running* XRD.
5. Persiapan *running*: nyalakan X-RD MAXima dan komputer, buka X-RD *software*. Masukkan sampel powder ketatakan/sample holder, padatkan dan ratakan permukaan dengan menggunakan spatula dan kaca preparat. Menghindari kontaminasi bersihkan sample holder dan kaca preparat dengan tisu/kuas untuk sampel berbeda.
6. Proses *running* : Masukkan *sample holder* ke dalam *sample stage* X-RD sesuai nomor urutan dan sesuaikan dengan sampel id. Pastikan sampel terpasang dengan benar



Sampel mesh +200 (kiri) dan mesh -200 (kanan)



Proses memasukkan powder sampel mesh #200 ke sample holder XRD

dan stabil, *running* dengan tahapan yang ada di X-RD *software*, masukkan informasi sampel (ID, nama, lokasi, deskripsi), tentukan file output. Waktu *quick scan* XRD persampel 40 menit.

7. Export data: *Export* ke format umum (xy, asc, txt) untuk proses analisis, *backup raw data* dalam format *native software*.

Analisis Data XRD

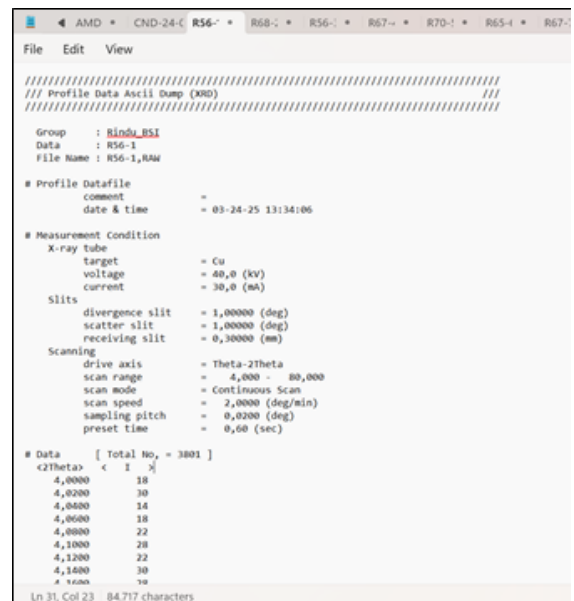
Analisis dapat dilakukan secara manual atau dengan *software* X'Pert HighScore Plus. Apabila analisis manual dengan pembacaan puncak-puncak (*peak*) dari nilai sudut dan intensitas pada grafik yang dihasilkan pada setiap sampel. Data yang dihasilkan berupa sudut dan intensitas. Lakukan pembacaan *peak* dengan menggunakan tabel panduan "*Table of key lines in X-ray powder diffraction patterns of minerals in clays and associated rocks*" dari Chen, P. Y. (1977).

Analisis manual dilakukan dengan data yang dihasilkan dari proses pengoperasian XRD MAXima berupa data nilai sudut dan nilai intensitas. Selanjutnya dimasukkan ke dalam excel dengan mengubah tanda desimal titik (.) menjadi koma (,). Setelah itu, data tersebut dipilih untuk dibuat diagram grafik dengan menempatkan data sudut pada sumbu (X) dan intensitas pada sumbu (Y). Kemudian, puncak-puncak (*peak*) pada grafik tersebut dibaca beserta nilai sudut pada setiap puncak.

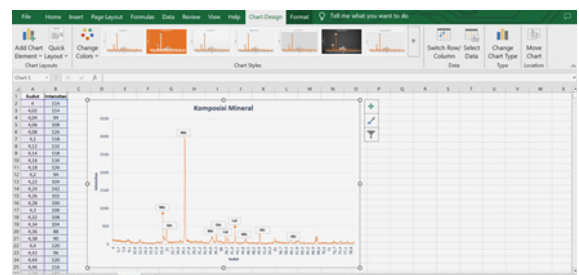
Analisis otomatis dengan *software* X'Pert HighScore Plus dirancang untuk mempercepat proses identifikasi mineral dengan memanfaatkan algoritma *search-match* yang *powerful* dan database ICDD yang komprehensif. Proses dimulai dengan import data XRD ke dalam *software* dalam format (.raw, .rd, .txt, .xy, dan .xrdml). Langkah selanjutnya adalah *pre-processing* data yang dapat dilakukan secara otomatis atau manual, pilih *automatic* dan *software* akan secara otomatis menentukan dan mengurangi *background* dari pola difraksi. Kemudian klik *Search* dan *software* akan mengidentifikasi serta menandai semua puncak difraksi secara otomatis. Tahap krusial adalah *automatic search-match* untuk identifikasi mineral. Pilih



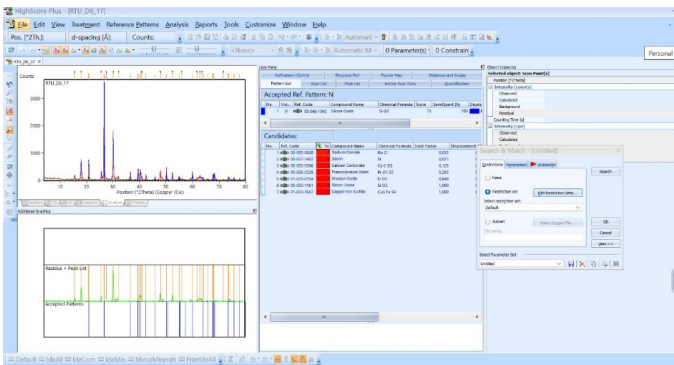
Proses Running pada mesin XRD



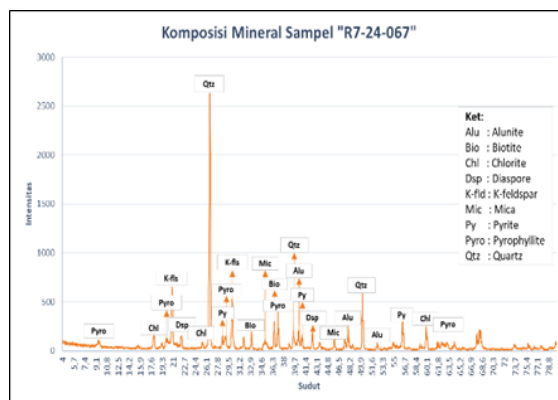
Hasil data nilai sudut dan intensitas dalam format (.txt) dari running XRD



Analisis manual data XRD dengan grafik pada Exel



Analisis otomatis data XRD dengan search-match pada software X'Pert HighScore Plus

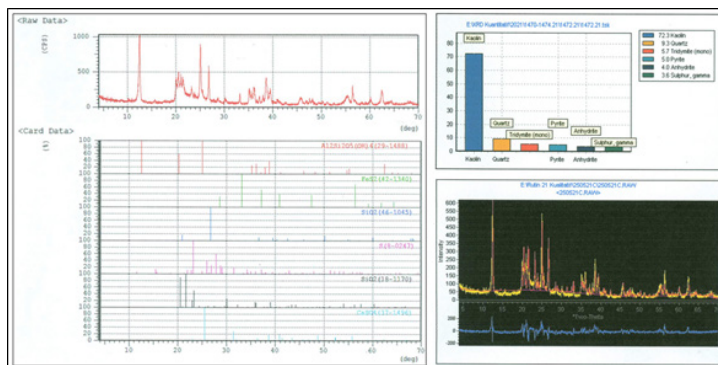


Analisis kuantitatif XRD menunjukkan komposisi mineral assemblage tipe alterasi argilik.

mineral group yang relevan seperti *Silicates*, *Clays*, *Oxides*, atau *Sulfides* untuk mempersempit pencarian, lalu evaluasi hasil *search otomatis*, data dapat di-export dan di-reporting.

Studi Kasus Analisis XRD

Berdasarkan analisis kualitatif dengan cara manual pembacaan *peak-peak* pada sampel yang dianalisis, teridentifikasi mineral alunite, biotit, klorit, diaspor, k-feldspar, mika, pirit, piropilit, dan kuarsa. Keberadaan K-feldspar dan biotit merupakan indikator kuat alterasi potasik, dengan temperatur sangat tinggi ($>350^{\circ}\text{C}$) dan pH netral hingga alkaline. Kehadiran mineral kunci seperti alunite, piropilit, dan diaspor merupakan indikator yang sangat kuat untuk zona argilik lanjut (*advanced argillic*), yang terbentuk pada kondisi pH sangat asam ($\text{pH} < 3$), temperatur moderate hingga tinggi ($250\text{--}350^{\circ}\text{C}$). Berdasarkan *assemblage* mineral yang teridentifikasi, mengindikasikan bahwa batuan ini mengalami dua fase alterasi yang berbeda. Sampel ini menunjukkan karakteristik khas dari fase pertama alterasi potasik



Analisis kualitatif XRD menunjukkan komposisi mineral assemblage merupakan fase alterasi potasik ter-overprint oleh alterasi advanced argillic.

yang kemudian di-overprint oleh alterasi *advanced argillic*.

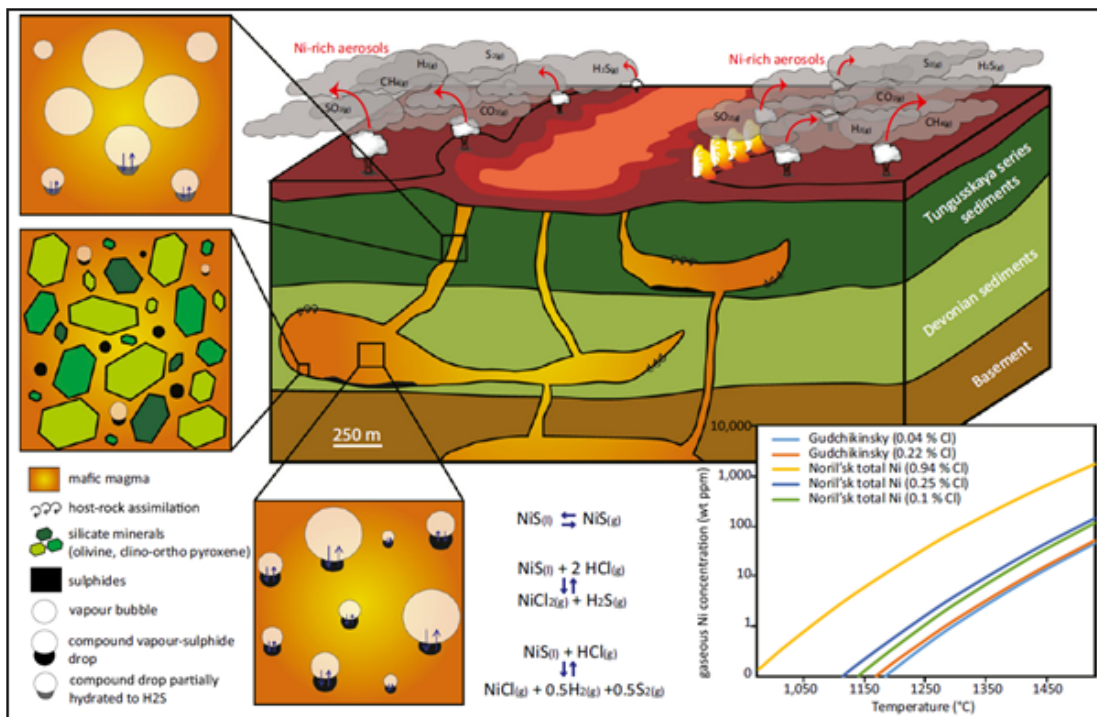
Analisis kuantitatif dengan cara otomatis dengan software X'Pert HighScore Plus pada sampel yang dianalisis, komposisi mineral *assemblage* teridentifikasi mineral-mineral 72,3% kaolinit, 9,3% kuarsa, 5,7% tridimit, 5% pirit, 4% anhidrit, dan 3,6% sulfur. Kehadiran kaolinit sebagai mineral lempung dominan mengindikasikan kondisi alterasi argilik yang terbentuk pada pH rendah hingga moderate ($\text{pH} 3\text{--}5$) dengan temperatur sekitar $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Sampel ini menunjukkan karakteristik khas dari zona alterasi argilik dengan komponen sulfat tinggi, yang sangat *typical* dari sistem epitermal sulfidasi tinggi.

Penulis: Alumna Teknologi Geologi, Angkatan 2022

Nikel Sulfida: Hasil Aktivitas Magmatik Mafik-Ultramafik

Oleh: Haikal Malik Fawwaz Sapriana
dan Putri Rindu Bunga Kasih, A.Md

Nikel adalah logam penting yang digunakan dalam berbagai produk sehari-hari, dari baja tahan karat hingga baterai kendaraan listrik. Namun, jarang diketahui bahwa sumber utama nikel berasal dari proses alam yang terjadi jauh di dalam bumi, di mana magma mafik-ultramafik memegang peranan kunci.

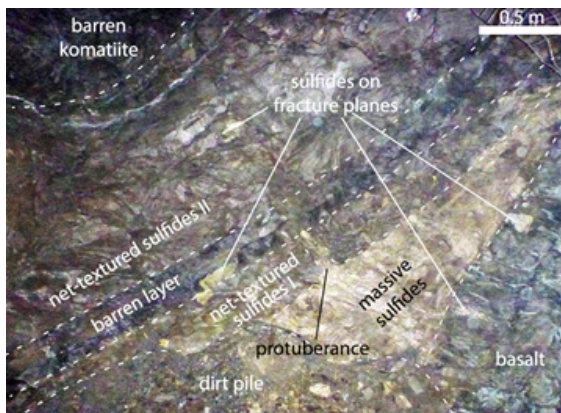


Artikel ini mengupas proses alami yang menyebabkan sulfida terpisah dari magma dan membentuk konsentrasi nikel primer yang bernilai tinggi. Bagaimana nikel sulfida bisa terkonsentrasi dalam jumlah besar di dalam bumi? Mengapa deposit nikel sulfida tidak tersebar merata, melainkan terkumpul di lokasi-lokasi tertentu dengan kadar yang sangat tinggi? Jawabannya terletak pada proses geologis yang menakjubkan yaitu pemisahan sulfida dari magma.

Hubungan genetik dan spasial antara gelembung-gelembung gas dan *droplet* sulfida kaya Ni, yakni erat kaitannya dengan terbentuknya uap magmatik dan *droplet* sulfida kaya Ni di bagian bawah zona magma. Pada proporsi fase (sulfida cair dan uap) tertentu, memungkinkan gelembung uap dan *droplet* sulfida terbawa mengapung dan bermigrasi (cenderung ke arah vertikal) di dalam magma mafik yang jauh lebih padat. Mekanisme tersebut mirip mengapungnya balon udara dengan muatan keranjang di bagian bawahnya. Dalam proses migrasinya, gelembung-gelembung dan *droplet* sulfida terendapkan ketika magma jenuh uap, membentuk endapan nikel sulfida (Vaillanta, dkk., 2016).

Endapan nikel di dunia secara umum dibagi menjadi dua tipe utama yang terbentuk melalui proses geologis yang sangat berbeda. Tipe pertama adalah nikel laterit atau yang disebut juga nikel sekunder, tipe kedua adalah nikel sulfida atau nikel primer.

Tipe pertama, nikel laterit terbentuk dari proses pelapukan kimia batuan ultramafik di permukaan bumi yang berlangsung selama jutaan tahun. Kadar nikel dalam deposit laterit umumnya berkisar antara 1-2%. Untuk terbentuk akumulasi nikel laterit dengan ketebalan 1 mm membutuhkan kurun waktu sekitar 100 tahun (Ahmad, 2006). Deposit nikel



Dua lapisan endapan sulfida, tekstur jaring (*net-textured*) berada di atas dari sulfida masif. Ketebalan sulfida tekstur jaring I mencapai 3 meter di bagian tengah, sedangkan sulfida *net-textured* II mempunyai ketebalan mencapai 5 meter serta menunjukkan pelapisan internal pada skala cm akibat proporsi sulfida yang bervariasi, lokasi di Kambalda, Western Australia (Staudé, dkk., 2020).

laterit ekonomis di Indonesia terdapat antara lain di Sulawesi, Maluku, dan Papua.

Tipe kedua adalah nikel sulfida atau nikel primer yang terbentuk langsung dari proses magmatik (*magmatic segregation*) di dalam bumi, bukan karena proses hidrotermal. Dalam proses ini, sulfida cair memisahkan diri dari magma silikat dan mengkonsentrasikan logam-logam tertentu termasuk nikel. Kadar nikel dalam deposit sulfida jauh lebih bervariasi, mulai dari 0,5% hingga 5%, bahkan di zona-zona sangat kaya dapat mencapai 20% atau lebih. Deposit sulfida primer yang terkenal di dunia antara lain Sudbury di Kanada, Norilsk di Rusia, dan Jinchuan di China.

Nikel primer atau sulfida magmatik merupakan deposit nikel dengan kualitas terbaik dan sering mengandung logam mulia seperti PGE (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, dan Os), Cu, Co, Au, dan Ag sebagai produk sampingan yang sangat berharga. Mineral sulfida utama penyusun nikel sulfida seperti pentlandit, pirhotit, dan kalkopirit mengalami kristalisasi dan mengendap secara bersamaan. Apabila batuan ultramafik (peridotit) yang tersusun dari mineral olivin dan piroksen bereaksi dengan fluida hidrotermal pada temperatur 200-400°C, mengubah mineral-mineral primer tersebut menjadi mineral serpentin, sehingga disebut proses serpentinisasi [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$]. Ketika *pentlandite* [$(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$] berinteraksi dengan alterasi hidrotermal temperatur rendah (<200°C) akan membentuk millerite murni [NiS].



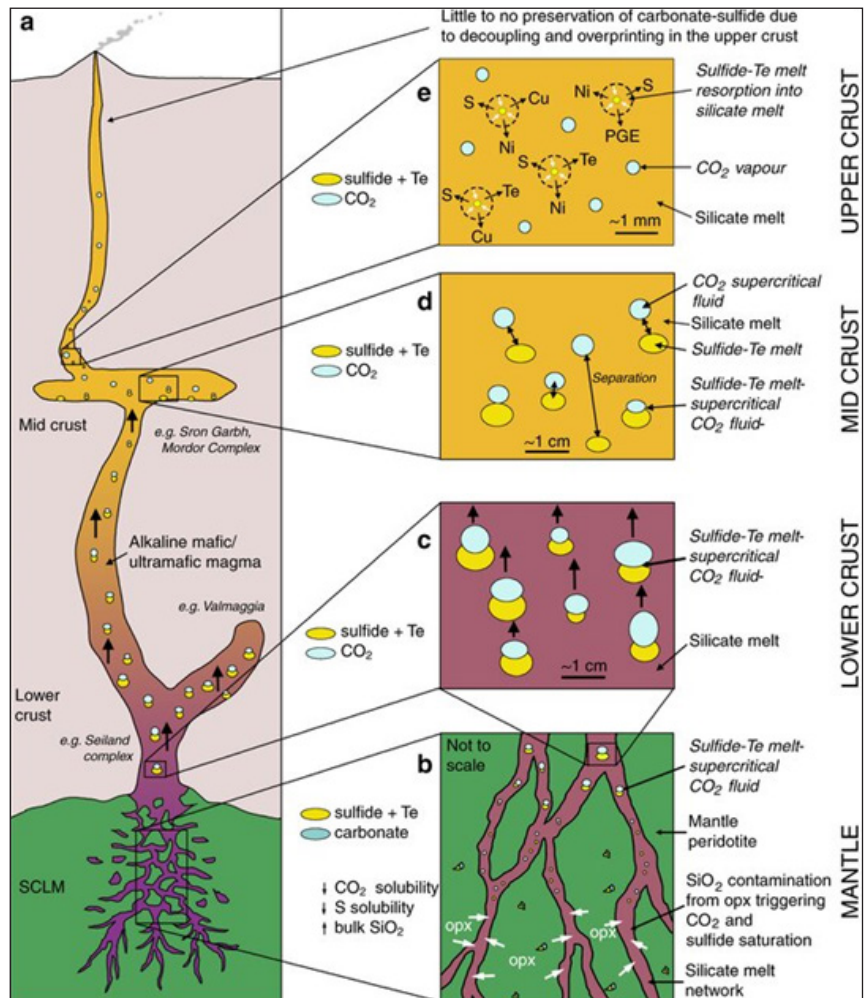
Sampel inklusi diorit kuarsa dari Tambang Froot dengan inklusi gabro terrekristalisasi, dan fragmen sulfida dalam diorit yang termineralisasi (lihat juga Pattison, 1979) (kiri). Sulfida berbentuk gelembung (globuler) yang tersebar dalam gabro-dolerit pikritis dari Tambang Oktyabrysk, Intrusi Kharaelakh, Siberia, Rusia (modifikasi dari Lightfoot, 2007) (kanan).

Mengapa Magma Mafik-Ultramafik?

Tidak semua jenis magma mampu membentuk deposit nikel sulfida yang ekonomis. Hanya magma dengan komposisi mafik dan ultramafik yang memiliki "resep kimia" yang tepat untuk membentuk deposit nikel berkualitas tinggi. Magma mafik-ultramafik adalah magma yang kaya mineral berat seperti olivin dan piroksen, dan merupakan sumber utama logam nikel dan tembaga. Magma ini berasal dari bagian mantel bumi yang meleleh dan mengeluarkan batuan mafik serta ultramafik.

Magma mafik memiliki kandungan silika atau SiO_2 antara 45 - 52%, kaya akan unsur besi, magnesium, dan kalsium. Ketika magma ini membeku, akan membentuk batuan seperti basalt di permukaan atau gabbro di bawah permukaan. Suhu magma mafik berkisar antara 1000 hingga 1200°C, dan batuan yang dihasilkan berwarna gelap karena banyak mengandung mineral-mineral berwarna gelap seperti piroksen dan amfibol.

Sementara itu, magma ultramafik memiliki kandungan silika yang lebih rendah lagi yaitu kurang dari 45 persen, tetapi sangat kaya akan besi dan magnesium. Magma ultramafik menghasilkan batuan seperti peridotit, komatiit, dan dunit ketika membeku.



(a) Model yang menunjukkan peran C (karbon) dalam mengangkut sulfida kaya logam dari mantel ke kerak bumi. (b) Migrasi lelehan parsial derajat rendah yang bereaksi dengan ortopiroksen (opx) menyebabkan kontaminasi SiO_2 yang memicu supersaturasi CO_2 dan sulfida. (c) Migrasi ke arah atas, lelehan sulfida kaya logam melalui tarikan/ikatan fisik terhadap tetapan (*droplet*) fluida superkritis kaya CO_2 berdensitas rendah. (d) Pemisahan fluida superkritis kaya CO_2 dan lelehan sulfida di tengah kerak bumi. (e) Pelarutan kembali sulfida di tengah hingga atas kerak bumi menjadi lelehan silikat dan selanjutnya terlepas dari CO_2 (Blanks, dkk., 2020).

Yang membuat magma ultramafik istimewa adalah suhunya yang sangat tinggi, mencapai 1200-1600°C, bahkan lebih panas dari lava yang kita kenal di gunung berapi. Batuan ultramafik berwarna sangat gelap hingga kehijauan karena dominasi mineral olivin yang kaya magnesium.

Magma mafik dan ultramafik memiliki beberapa keistimewaan yang membuatnya menjadi pembentuk deposit nikel sulfida. Pertama, magma yang berasal dari mantel bumi ini secara alami sudah kaya nikel dengan kandungan sekitar 2000 ppm atau

setara dengan 0,2%. Kedua, suhu yang sangat tinggi memungkinkan sulfur larut dalam magma dan sulfida dapat berada dalam fasa cair. Ketiga, karena miskin silika, magma ini tidak membentuk mineral silikat terlalu cepat sehingga memberi waktu bagi sulfida untuk memisahkan diri. Keempat, magma ini terbentuk dalam kondisi reduksi atau miskin oksigen, yang merupakan lingkungan ideal untuk sulfida tetap stabil dan tidak teroksidasi.

Peran Sulfur: Kunci Konsentrasi Nikel

Sulfur atau belerang adalah unsur yang menjadi peran utama dalam seluruh proses pembentukan deposit nikel sulfida. Tanpa kehadiran sulfur, nikel akan tetap tersebar secara merata dalam mineral-mineral silikat dan tidak akan pernah terkonsentrasi menjadi deposit yang ekonomis.

Mengapa peran sulfur begitu penting? Jawabannya terletak pada sifat kimia nikel yang memiliki afinitas (kecenderungan berikatan) sangat kuat dengan sulfur. Dalam ilmu geokimia, nikel termasuk dalam kelompok unsur *chalcophile*, yaitu unsur-unsur yang menyukai atau memiliki kecenderungan kuat untuk berikatan dengan sulfur dibandingkan dengan oksigen atau silikon.

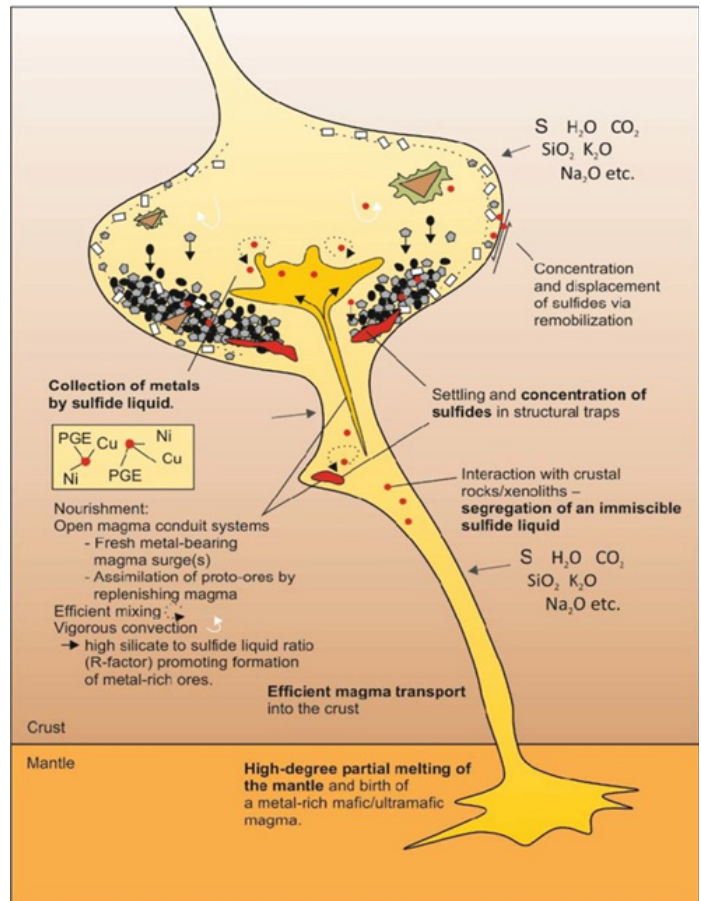
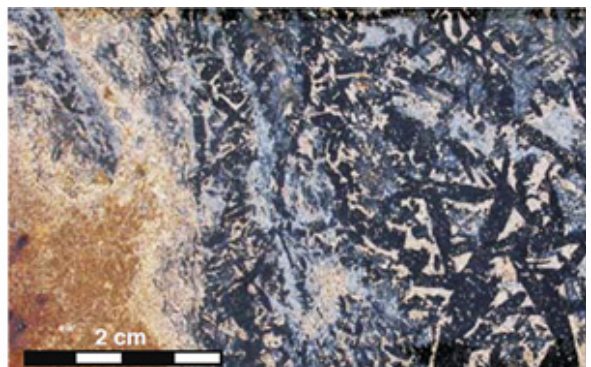
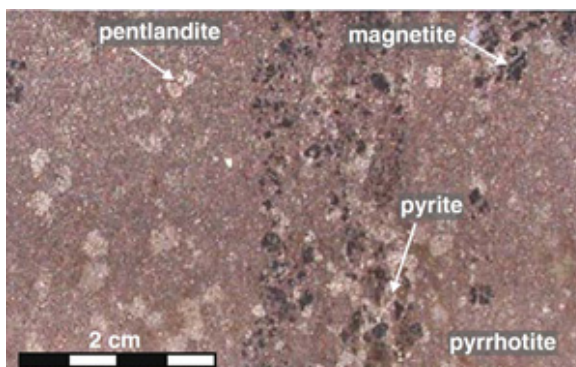
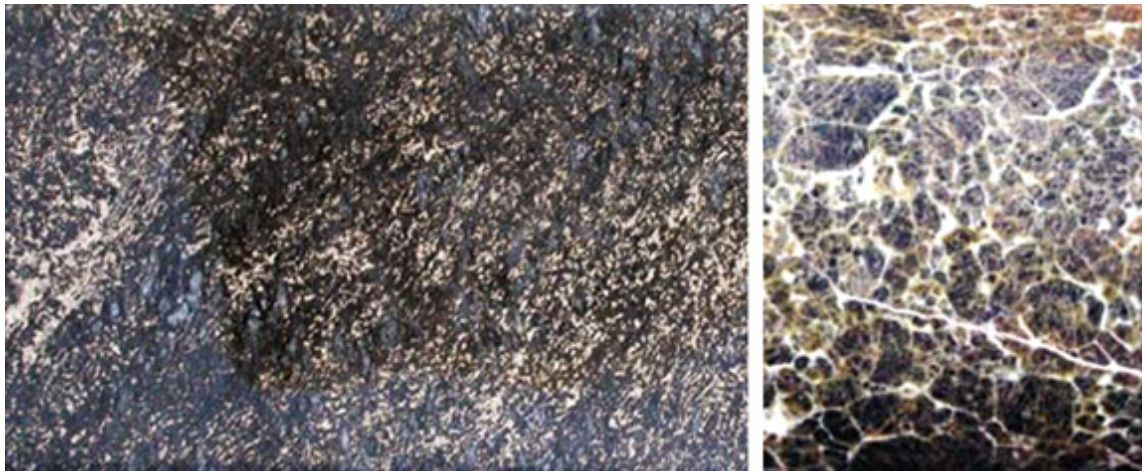


Diagram yang menunjukkan perkembangan endapan sulfida Ni-Cu-(PGE) magmatik (Luolavirta, 2018)



Sulfida masif dengan tingkat deformasi rendah mengandung pirotit 85% volume, pentlandit 6%, 5% magnetit, 2% pirit, dan 2% kalkopirit (kiri). Mineralisasi sulfida tipe matriks (*net textured* atau tekstur seperti jaring) dalam serpentinit bertekstur olivin metamorf berbilah. Matriks pirotit-pentlandit dipotong oleh urat sulfida masif setebal 10 cm. Dalam spesimen ini, terjadi remobilisasi lokal dari sulfida masif yang terjadi setelah pembentukan kristal olivin metamorf berbilah, sampel dari deposit Ni-Cu-(PGE) Perseverance, Australia (Duuring, dkk., 2010) (kanan).



Sulfida tersebar (*disseminated*) dalam komatiit yang terserpentinisasi, terdapat sekitar 5% volume pirrhotit dan pentlandit mengisi di antara mineral silikat (kiri). Serpentin dengan tekstur *adcumulate* yang merupakan representasi inti dunit dari Kompleks Ultramafik Perseverance, sampel dari deposit Ni-Cu-(PGE) Perseverance, Australia (Duuring, dkk., 2010) (kanan).

Ketika sulfur hadir dalam magma dan kondisi mencapai saturasi sulfur (magma telah mencapai atau melampaui jumlah maksimum sulfur yang dapat terlarut di dalamnya pada suhu dan tekanan tertentu), maka nikel akan meninggalkan mineral-mineral silikat seperti olivin dan piroksen, lalu berpindah masuk ke dalam fase sulfida cair. Kekuatan pemisahan ini dapat dikuantifikasi dengan koefisien partisi yang menunjukkan berapa kali lebih besar konsentrasi nikel dalam sulfida dibanding dalam magma silikat. Artinya, jika hanya ada satu persen sulfida cair dalam magma, sulfida tersebut mampu menyerap nikel 10 hingga 100 kali lebih banyak dibandingkan dengan 99% magma silikat sisanya.

Proses Pembentukan Sulfida Magmatik

Perjalanan pembentukan deposit nikel sulfida dimulai jauh di dalam perut bumi, tepatnya pada kedalaman 50 hingga 200 km di zona yang disebut mantel atau selubung bumi. Mantel bumi terdiri dari batuan ultramafik padat yang didominasi oleh mineral peridotit. Dalam kondisi normal, komponen mantel ini berada dalam keadaan padat meskipun suhunya sangat tinggi karena tekanan yang sangat besar di kedalaman tersebut. Namun

ketika kondisi tertentu terjadi, sebagian kecil dari batuan mantel ini dapat meleleh membentuk magma. Pelelehan parsial mantel dapat terjadi melalui beberapa mekanisme. Di zona *rifting* atau titik panas mantel, penurunan tekanan akibat peregangan kerak bumi dapat menurunkan titik leleh batuan mantel sehingga terjadi pelelehan. Di zona subduksi, air yang terbawa oleh lempeng samudera yang menunjam ke bawah akan menurunkan titik leleh batuan mantel di atasnya. Kenaikan suhu lokal akibat naiknya kolom panas dari mantel dalam yang disebut *mantle plume* juga dapat menyebabkan pelelehan. Hasil dari pelelehan parsial ini adalah magma ultramafik primitif yang sangat panas dengan suhu mencapai 1300 - 1600° C.

Magma primitif ini membawa kandungan nikel antara 1500 - 2500 ppm atau sekitar 0,15 - 0,25%, serta sulfur antara 500 - 1500 ppm atau 0,05 - 0,15%. Magma ini terbentuk dalam kondisi sangat miskin oksigen atau kondisi reduksi, yang sangat penting untuk stabilitas sulfida nantinya. Karena densitasnya lebih rendah dari batuan sekitar, magma ini mulai naik ke permukaan melalui rekahan-rekahan, sesar, atau saluran yang disebut *conduit*. Dalam perjalanan naiknya, banyak hal dapat terjadi yang akan mempengaruhi evolusi magma dan

potensi pembentukan deposit nikel.

Magma yang sedang naik dapat mengasimilasi atau melelehkan batuan dinding yang dilewatinya, proses yang disebut *crustal contamination*. Magma juga dapat bercampur dengan magma lain yang berbeda komposisi atau tingkat evolusinya, proses yang disebut *magma mixing*. Selama perjalanan ini pula, kristalisasi fraksionasi mulai terjadi di mana mineral-mineral yang lebih berat atau yang titik lelehnya lebih tinggi mulai mengkristal lebih dahulu. Mineral olivin yang kaya magnesium biasanya mengkristal paling awal, diikuti oleh piroksen dan plagioklas. Semua proses ini akan mengubah komposisi magma dan sangat mempengaruhi apakah magma tersebut nantinya akan membentuk deposit nikel atau tidak.

Momen paling krusial dalam pembentukan deposit nikel sulfida adalah saat tercapainya saturasi sulfur dalam magma. Sebelum mencapai saturasi, magma berada dalam kondisi *undersaturated* di mana seluruh sulfur larut sempurna dalam magma silikat. Dalam kondisi ini belum ada sulfida cair yang terbentuk, dan nikel tetap tersebar secara homogen dalam magma. Namun ketika konsentrasi sulfur mencapai batas kelarutannya yang disebut *Sulfur Content at Sulfide Saturation (SCSS)*, saat itulah sulfur mulai memisahkan diri dari magma silikat dan membentuk fase sulfida cair. Begitu sulfida cair terbentuk, nikel segera mulai berpindah masuk ke dalam sulfida karena afinitas kimianya yang sangat kuat.

Ada beberapa mekanisme yang dapat menyebabkan magma mencapai saturasi sulfur. Mekanisme pertama adalah penurunan suhu magma. Kelarutan sulfur dalam magma silikat sangat tergantung pada suhu, di mana semakin rendah suhu, semakin rendah pula kemampuan magma melarutkan sulfur.

Kelebihan sulfur yang tidak dapat lagi larut akan membentuk sulfida cair.

Mekanisme kedua adalah kristalisasi fraksionasi. Ketika mineral-mineral silikat seperti olivin dan piroksen mengkristal keluar dari magma, mineral-mineral ini tidak menyerap sulfur ke dalam strukturnya. Akibatnya, sulfur menjadi semakin terkonsentrasi dalam magma cair yang tersisa. Meskipun volume magma berkurang akibat kristalisasi, jumlah absolut sulfur tetap sama sehingga konsentrasinya meningkat hingga akhirnya mencapai titik saturasi. Proses ini penting tetapi biasanya menghasilkan deposit dengan kadar relatif rendah karena terjadi setelah sebagian nikel sudah terambil oleh olivin.

Mekanisme ketiga adalah asimilasi batuan sedimen yang kaya sulfur. Ketika magma ultramafik migrasi naik dan mengintrusi kerak benua, magma ini dapat melelehkan batuan-batuan sedimen seperti serpih hitam atau *black shale* yang sangat kaya bahan organik dan sulfur, atau batuan evaporit seperti anhidrit dan gipsium yang mengandung sulfat. Sulfur dari batuan sedimen ini masuk ke dalam magma menyebabkan penambahan sulfur eksternal yang sangat signifikan, sehingga saturasi sulfur tercapai dengan cepat.

Mixing antara dua magma dengan komposisi berbeda, serta perubahan kondisi oksidasi-reduksi atau fugasitas oksigen dalam magma. Ketika magma panas dan primitif bercampur dengan magma yang lebih dingin dan sudah mengalami evolusi, perubahan komposisi dan suhu secara tiba-tiba dapat memicu saturasi sulfur. Sementara itu, kenaikan fugasitas oksigen (ketersediaan efektif atau kecenderungan oksigen untuk bereaksi dalam sistem pada kondisi tidak ideal atau tekanan dan temperatur tinggi) dapat mengoksidasi sulfur dari bentuk sulfida menjadi sulfat, yang kemudian memicu presipitasi sulfida dari larutan.

Setelah sulfida cair terbentuk melalui saturasi sulfur, dimulailah proses pemisahan fisik antara fase sulfida dan fase magma silikat.

Pemisahan ini dimungkinkan karena perbedaan sifat fisik yang sangat mencolok antara kedua fase tersebut. Sulfida cair memiliki densitas atau berat jenis yang jauh lebih tinggi yaitu sekitar 4,5 hingga 5,0 g/cm³, sementara magma silikat hanya memiliki densitas 2,6 hingga 2,9 g/cm³. Selain itu, sulfida cair memiliki viskositas yang sangat rendah yaitu hanya 0,1 hingga 1 Pa·s (Pascal-detik), membuat sulfida sangat encer dan mudah mengalir, berbeda dengan magma silikat yang jauh lebih kental dengan viskositas 100 hingga satu juta Pa·s. Sulfida cair juga memiliki sifat *wetting* yang baik terhadap mineral, artinya sulfida dapat membasahi dan menempel pada permukaan kristal mineral.

Proses pemisahan dimulai dengan nukleasi atau pembentukan inti sulfida. Sulfida mulai terbentuk sebagai tetesan-tetesan mikroskopis dengan ukuran 1 hingga 100 mikron. Begitu tetesan-tetesan kecil ini terbentuk, mereka mulai bergerak dalam magma dan saling bertabrakan satu sama lain, mereka bergabung membentuk tetesan yang lebih besar dalam proses yang disebut koalesensi. Proses koalesensi ini sangat penting karena ukuran tetesan menentukan kecepatan tenggelamnya. Semakin besar tetesan sulfida, semakin cepat ia tenggelam ke dasar *magma chamber* karena pengaruh gravitasi. Karena sulfida jauh lebih berat daripada magma dan memiliki viskositas rendah, tetesan sulfida akan tenggelam ke dasar *magma chamber* dengan kecepatan beberapa sentimeter per jam untuk *droplet* kecil, hingga beberapa meter per hari untuk *droplet* besar.

Proses *settling* atau pengendapan gravitasi ini menyebabkan sulfida terakumulasi di bagian dasar *magma chamber*. Seiring waktu, sulfida yang terus mengendap membentuk lapisan atau zona kaya sulfida yang disebut *sulfide cumulate*.

Ketebalan lapisan sulfida ini bervariasi dari beberapa sentimeter hingga puluhan meter tergantung pada jumlah sulfida yang terbentuk

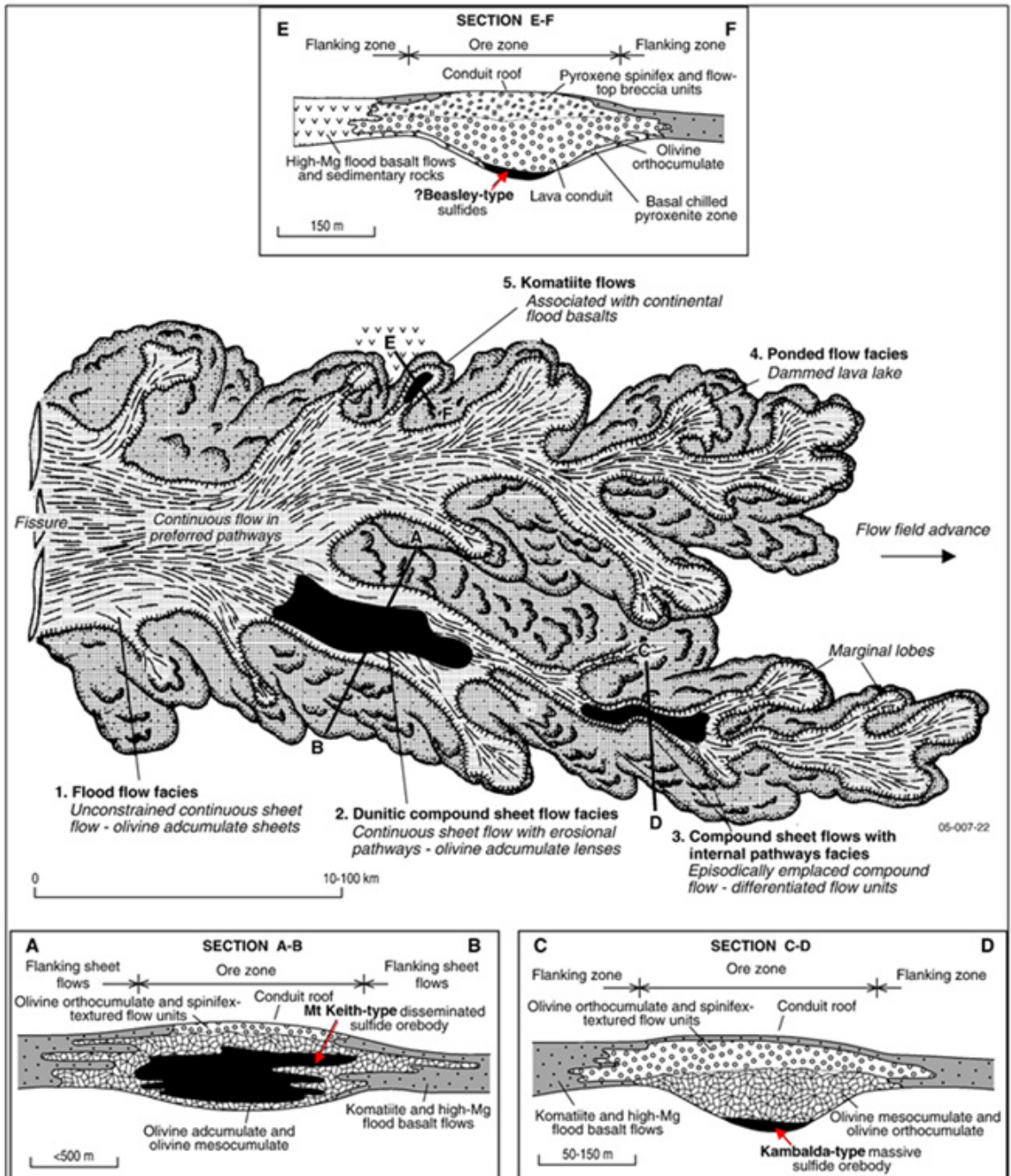
dan geometri *magma chamber*. Deposit nikel sulfida didominasi oleh *pentlandite* [(Fe,Ni)₉S₈] sebagai mineral bijih nikel utama dan *pyrrhotite* [Fe_{1-x}S] sebagai mineral sulfida dominan, disertai kalkopirit [CuFeS₂] yang mengandung tembaga, *millerite* [NiS] dengan kandungan nikel tinggi, serta *violarite* [FeNi₂S₄] sebagai mineral alterasi.

Nikel Sulfida Berasosiasi dengan Unsur Grup Platinum dan Tembaga

Selain nikel sulfida menjadi penghasil logam nikel, juga menjadi penghasil utama mineral ikutan berupa *Platinum Group Elements* (PGE). PGE seperti Platinum (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh), memiliki sifat yang sangat penting, yaitu sangat "siderofil" (suka besi) dan "kalkofil" (suka belerang). Artinya, dalam sistem magmatik, PGE lebih suka berikatan dengan besi atau belerang daripada berikatan dengan silikat yang membentuk batuan. Namun, ketika magma mendingin, PGE tidak bisa masuk ke dalam struktur kristal mineral silikat biasa (seperti olivin atau piroksin). Hal ini mengingat PGE menjadi "terlalu besar" dan "tidak cocok". Karena ketidakmampuan ini, PGE tetap tersebar dalam sisa magma (disebut *residual melt*) dalam konsentrasi yang sangat rendah. Di sinilah peran nikel sulfida dan tembaga dimulai.

Kondisi tersebut inti dari segalanya, yakni cairan sulfida yang baru terbentuk ini memiliki afinitas kimia yang sangat kuat terhadap PGE. PGE memiliki koefisien partisi (ukuran atau tingkatan seberapa suka suatu unsur untuk pindah ke fase lain) yang sangat tinggi antara cairan sulfida dan magma silikat. Angkanya bisa mencapai 10.000 hingga 100.000. Artinya, hampir semua PGE yang tersebar di dalam magma akan "ditarik" dan "diperas" masuk ke dalam tetesan (*droplet*) cairan sulfida ini. Proses ini seperti *spons* (cairan sulfida) yang menyerap tinta (PGE) dari air (magma silikat). Dalam hal ini peran tembaga bersifat kalkofil dan juga bertindak sebagai pengumpul, terutama untuk PGE tertentu seperti Palladium.

Penulis: Mahasiswa Teknologi Geologi, Angkatan 2024 dan Alumna Teknologi Geologi, Angkatan 2022.

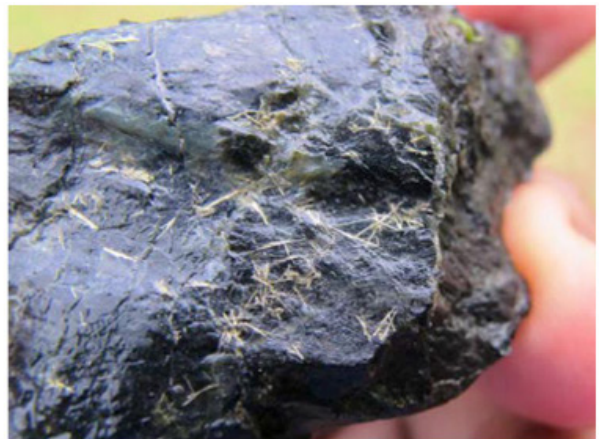
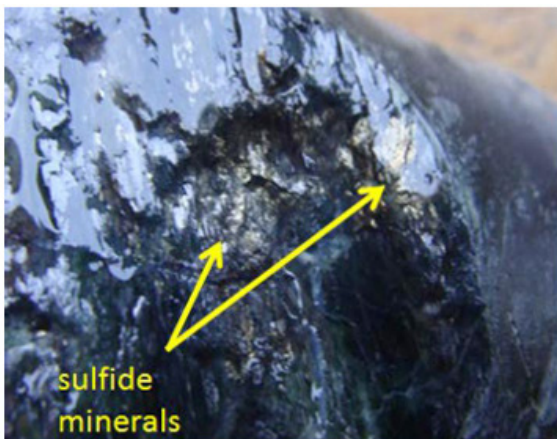


Hubungan antara berbagai fasies komatiit dan tipe mineralisasi nikel. Gambar menunjukkan contoh endapan di Mt Keith—tipe 1B (bagian A–B), Kambalda—tipe 1A (bagian C–D), dan Beasley—tipe (bagian E–F) (modifikasi dari Dowling dan Hill (1998) dalam Hoatson, dkk., 2006).

Nikel Sulfida: Hasil Alterasi Serpentinisasi

Oleh: Putri Rindu Bunga Kasih, A.Md

Nikel merupakan logam berwarna perak keputihan, komponen penting ini bersembunyi di balik kehidupan moderen kita. Saat anda mengecek ponsel ketika bangun di pagi hari, peralatan rumah tangga stainless steel, atau melihat mobil listrik melintas di jalan, tanpa sadar anda sedang berinteraksi dengan nikel. Lebih dari 3 juta ton nikel digunakan setiap tahun di seluruh dunia, setara dengan berat 15 ribu pesawat Boeing 747!



Sulfida tersebar dalam serpentininit (kiri), milerit (NiS) menjarum tersebar pada serpentininit (kanan), lokasi di Sorowako, Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan (modifikasi dari Kumarawarman, dkk., 2016).

Dari uang logam, turbin pesawat jet, dari implant medis yang menyelamatkan nyawa, nikel ada di mana-mana. Proses pembentukan nikel sulfida berasosiasi erat dengan batuan ultramafik dan mafik yang kaya akan unsur-unsur ferro-magnesian. Pembentukan deposit nikel sulfida dapat terjadi melalui dua mekanisme utama yang berbeda namun saling berkaitan dalam konteks evolusi magma ultramafik. Pada pembahasan kali ini akan membahas lebih dalam terkait pembentukan nikel sulfida oleh proses hidrotermal.

Namun, untuk membangun pemahaman yang komprehensif, pembahasan akan dimulai dengan menguraikan mekanisme magmatik sebagai dasar perbandingan dan

konteks genetik. Nikel sulfida yang terbentuk dari aktivitas magmatik mafik-ultramafik yang secara alami sudah kaya nikel dengan kandungan sekitar 2000 ppm, ketika magma dari mantel menuju dangkal, volatil akan keluar besar-besaran, diantaranya gas CO₂. Gelembung CO₂ berperan sebagai pengangkut nikel sulfida, nikel sulfida akan memisahkan diri dari silikat (olivin, pirokin, dan silika) karena sifat *immiscible* (tidak dapat bercampur), sedangkan dengan CO₂ memiliki sifat *miscible* (bercampur). Sehingga nikel sulfida akan menempel pada gelembung CO₂ ikut naik menuju permukaan. Pada kondisi tertentu CO₂ tidak lagi mampu mengangkut nikel sulfida, nikel sulfida akan lepas dan mengendap membentuk mineral sulfida masif, lensa atau

bintik bintik, (terutama mineral pentlandit ($(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$, pirhotit, dan kalkopirit). Nikel juga termasuk dalam kelompok unsur yang menyukai atau memiliki kecenderungan kuat untuk berikatan dengan sulfur dibandingkan dengan oksigen atau silikon. Sulfur atau belerang adalah unsur yang menjadi kunci dalam pembentukan deposit nikel sulfida terkonsentrasi. Tanpa proses magmatik awal yang mengakumulasi nikel (seperti pembentukan kumulat olivin), serpentinisasi tidak akan memiliki sumber nikel yang cukup.

Setelah memahami bagaimana magma mafik-ultramafik menciptakan deposit nikel sulfida primer, pertanyaan menarik muncul: apakah hanya magma panas yang bisa membentuk nikel sulfida? Ternyata tidak, batuan ultramafik yang sama, bahkan yang sudah membeku jutaan tahun lalu, masih dapat membentuk nikel sulfida melalui jalur yang berbeda, yakni alterasi serpentinisasi. Proses ini tidak memerlukan magma baru, cukup dengan kehadiran air panas (hidrotermal) dan waktu yang cukup panjang. Berbeda dengan nikel sulfida yang terbentuk dari cairan sisa magma melalui aktivitas magmatik mafik-ultramafik, nikel sulfida hasil alterasi serpentinisasi dikontrol oleh aktivitas hidrotermal. Alterasi serpentinisasi tidak hanya menghasilkan mineral serpentin, tetapi juga menciptakan kondisi yang sangat menguntungkan untuk terjadinya mineralisasi logam tertentu.

Kisah nikel sulfida dimulai jauh di bawah kaki kita, di lapisan mantel bumi yang terletak puluhan hingga ratusan kilometer di bawah permukaan. Di sana, dalam kondisi tekanan dan suhu yang sangat tinggi, terdapat batuan mafik-ultramafik batuan yang sangat kaya akan magnesium dan besi, seperti batuan peridotit dan dunit. Batuan ultramafik ini memiliki komposisi kimia yang unik. Mereka terbentuk dari mineral olivin dan piroksen, yang dalam struktur kristalnya menyimpan berbagai unsur, termasuk nikel sebagai unsur ikutan (*trace element*). Nikel ini bukan hadir dalam bentuk bebas, melainkan terikat erat dalam kisi-kisi kristal mineral silikat, nikel (Ni) bersifat siderofil (suka pada besi) dan kompatibel, sehingga selama pembekuan magma, akan berada dalam mineral olivin daripada membentuk

sulfida sendiri. Konsentrasi nikel dalam batuan ultramafik biasanya berkisar antara 0,2% hingga 0,4% angka yang sangat signifikan dalam konteks geologi.

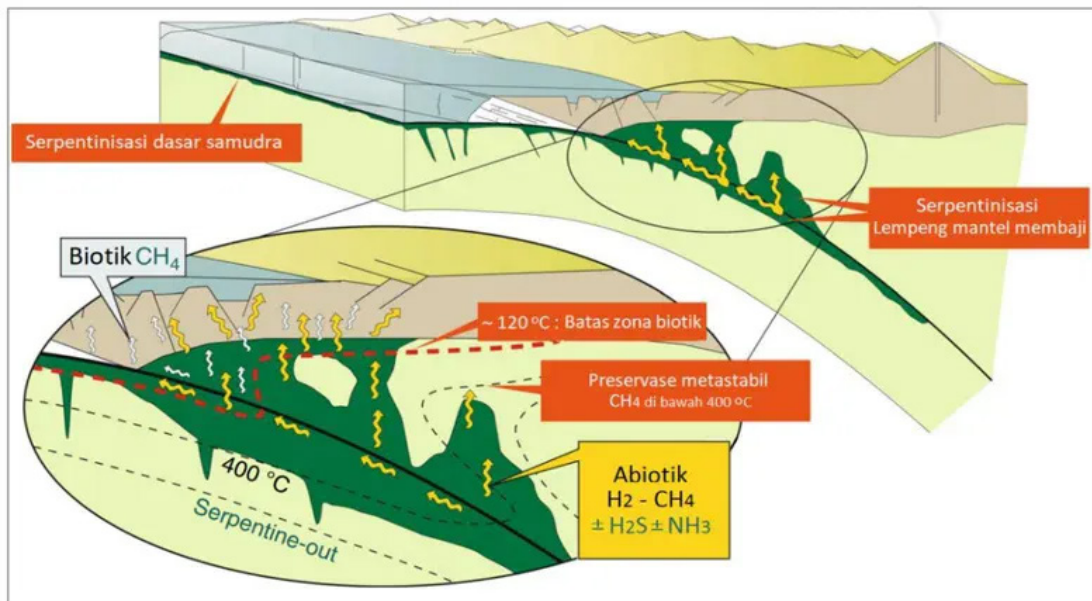
Pembentukan Nikel Sulfida

Serpentinisasi pada tekanan tinggi yang berkembang di zona subduksi serta keterkaitannya dengan pembentukan fluida kaya hidrogen (H_2) dan metana (CH_4). Proses ini diawali di dasar samudra, di mana batuan ultramafik pada mantel atas mengalami hidrasi akibat infiltrasi air laut melalui rekahan dan zona sesar, menghasilkan mineral serpentin. Tahap serpentinisasi awal ini menyebabkan perubahan mineralogi dan fisik batuan, serta memicu pelepasan fluida yang kaya akan hidrogen sebagai hasil reaksi oksidasi besi dalam mineral olivin.

Seiring dengan pergerakan lempeng samudra ke arah zona subduksi, batuan yang telah terserpentinisasi terbawa ke kedalaman yang lebih besar dan mengalami peningkatan tekanan dan temperatur. Pada kondisi tekanan tinggi dan suhu hingga sekitar $400\text{ }^\circ\text{C}$, mineral serpentin mulai mengalami reaksi lanjutan yang menghasilkan fluida kaya H_2 , disertai pembentukan senyawa tereduksi lainnya seperti CH_4 , serta kemungkinan H_2S dan NH_3 . Fluida ini bersifat abiotik dan terbentuk melalui reaksi redoks antara fluida dan mineral ultramafik, yang dikenal sebagai proses *serpentine-out*.

Pada zona yang lebih dangkal, dengan suhu di bawah sekitar $120\text{ }^\circ\text{C}$, aktivitas biotik dapat berkembang dan berkontribusi terhadap pembentukan metana biogenik (CH_4) oleh mikroorganisme. Namun, pada kondisi suhu yang lebih tinggi, CH_4 dapat terawetkan secara metastabil hingga temperatur sekitar $400\text{ }^\circ\text{C}$, memungkinkan keberadaan fluida kaya CH_4 di kedalaman yang signifikan. Fluida-fluida tersebut kemudian dapat bermigrasi melalui zona rekahan dan jalur permeabel menuju bagian atas sistem subduksi.

Secara keseluruhan, model ini menunjukkan bahwa serpentinisasi pada zona subduksi tidak hanya berperan dalam mengontrol sifat mekanik dan kimia mantel,



Model konseptual serpentinisasi pada tekanan tinggi dan genesa fluida kaya H₂-CH₄ di zona subduksi, (modifikasi dari Brovarone dkk., dalam Ajeng, 2023).

tetapi juga menjadi sumber utama fluida tereduksi yang kaya H₂ dan CH₄. Fluida tersebut memiliki implikasi penting terhadap siklus karbon dan hidrogen di kerak mantel, potensi pembentukan sistem hidrotermal, serta kemungkinan keberadaan ekosistem bawah permukaan pada lingkungan subduksi aktif.

Serpentinisasi

Serpentinisasi adalah sebuah proses ubahan oleh fluida panas atau disebut alterasi hidrotermal di mana mineral-mineral feromagnesian (seperti olivin dan piroksen) yang kaya akan magnesium dan besi, yang terdapat dalam batuan ultramafik-mafik (contoh: peridotit, dunit), bereaksi dengan fluida panas, membentuk mineral-mineral serpentin (contoh: antigorit, lizardit, krisotil). Ketika batuan ultramafik yang kaya nikel ini naik mendekati permukaan kemudian terpapar air entah air laut yang terperangkap atau dari fluida hidrotermal terjadilah proses yang disebut serpentinisasi.

Reaksi kimianya secara sederhana: Olivin ((Mg,Fe)₂SiO₄) + Piroksin ((Mg,Fe)SiO₃) + Air

(H₂O) → Serpentin (Mg₃Si₂O₅(OH)₄) + Magnetit (Fe₃O₄) + Hidrogen (H₂) + Panas (ΔH)

Reaksi serpentinisasi menghasilkan beberapa hal penting antara lain.

- Pelepasan nikel dari olivin:** reaksi serpentinisasi menghasilkan serpentin sebagai mineral baru, magnetit yang memberi warna gelap pada batuan, dan yang paling krusial, melepaskan unsur-unsur yang sebelumnya terikat dalam struktur kristal olivin dan piroksen. Hal ini disebabkan karena mineral serpentin memiliki struktur kristal yang tidak dapat menampung nikel dan logam lainya sebanyak olivin. Pelepasan unsur besi (Fe), nikel (Ni), tembaga (Cu) kobalt (Co), unsur platinum (PGE), dan logam lainya, yang dulunya terkunci rapat dalam olivin dan piroksin, kini "dibebaskan" dan larut dan dapat bergerak dalam fluida hidrotermal.
- Perubahan kimia:** proses serpentinisasi ini mengonsumsi air dan menghasilkan gas hidrogen (H₂). Reaksi antara air dan mineral yang kaya besi menciptakan

kondisi kimia yang sangat reduktif (sangat sedikit oksigen) dan bersifat basa (alkalin), hidrogen merupakan reduktor yang sangat kuat. Kehadirannya mengubah dan menciptakan kondisi yang sangat reduksi yang ideal untuk pengendapan mineral-mineral tertentu, kondisi ini membuat logam lebih mudah berpindah dan sulfur dapat bereaksi membentuk sulfida. Perubahan pH bersifat basa (alkalin) yang drastis ini adalah salah satu mekanisme terpenting dalam pengendapan mineral nikel dari larutan hidrotermal. Sedangkan mineral magnetit (Fe_3O_4) terbentuk sebagai produk sampingan. Pembentukannya sering kali berasosiasi dengan konsentrasi unsur-unsur lain seperti kobalt. Dalam proses inilah nikel dilepaskan dan dimobilisasi. Setelah terlepas dari mineral induknya, nikel kini dalam fase mobilisasi, bergerak bersama fluida hidrotermal dibawa oleh ligan bisulfida (HS^-) menuju ke tempat-tempat baru melalui struktur geologi, rekahan dan pori-pori batuan dan pada kondisi tertentu akan terendap. Konsentrasi nikel dalam fluida dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain suhu fluida, pH, kadar oksigen terlarut, dan yang paling penting adalah keberadaan sulfur. Di sepanjang jalur ini, fluida akan bereaksi dengan batuan yang dilaluinya, mengambil beberapa unsur dan meninggalkan yang lain, ini proses yang dinamis dan kompleks.

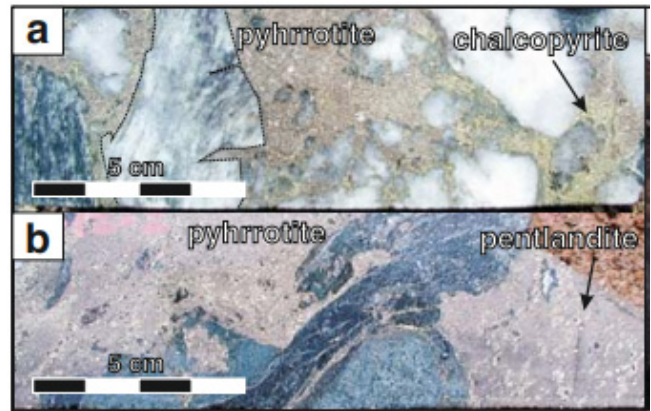
- c. **Penyediaan sulfur dan mekanisme pengendapan:** dalam perjalanannya, fluida kaya nikel ini harus bertemu dengan sumber sulfur, kondisi ini membuat sulfur dapat bereaksi membentuk sulfida. Penyediaan sulfur dan mekanisme pengendapan dapat disebabkan oleh dua faktor. Penambahan sulfur ketika fluida hidrotermal yang kaya nikel ini berinteraksi dengan batuan sekitarnya, terutama batuan sedimen laut kaya organik. Pertama, Nikel sulfida primer mungkin telah terbentuk sebelumnya, tetapi biasanya tersebar dan halus. Proses hidrotermal ini sering kali memusatkan butiran-butiran sulfida yang tersebar menjadi gumpalan (*massive*) yang lebih kaya dan lebih

besar, sehingga meningkatkan kadar nikelnya, disebut pengkayaan sekunder. Kedua, pembentukan sulfida baru ketika batuan yang mengalami serpentinisasi mengandung mineral sulfida besi primer seperti pirhotit ($\text{Fe}(1-x)\text{S}$), fluida yang kaya nikel dapat bereaksi dengannya. Nikel akan menggantikan posisi besi (Fe) dalam struktur kristal pirhotit, mengubahnya menjadi mineral nikel sulfida yang lebih kaya nikel, seperti pentlandit ($(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$).

- d. **Kontrol struktur:** proses serpentinisasi menyebabkan batuan mengembang volumenya dan menjadi rapuh, menciptakan banyak retakan dan zona *shear*. Struktur ini menjadi jalur permeabel yang ideal untuk pergerakan fluida hidrotermal, memusatkan aliran fluida yang membawa nikel dan memfokuskan pengendapan sulfida pada zona-zona tertentu
- e. **Transportasi nikel oleh ligan:** serpentinisasi berlangsung menyebabkan kondisi pH basa (alkalin), sulfur (S) yang sudah ada kemudian diubah menjadi bisulfida/sulfida ($\text{HS}^- / \text{H}_2\text{S}$) melalui proses reduksi. Sedangkan ligan klorida (Cl^-) sudah tersedia dalam jumlah besar dari air dalam sistem hidrotermal. Ligan berikatan dengan Ni^{2+} membentuk senyawa kompleks yang larut. Senyawa kompleks yang terbentuk: NiCl^+ , $\text{NiCl}_2(\text{aq})$, dll. Ion klorida adalah ligan yang sangat efektif dalam fluida hidrotermal bersuhu tinggi dan bersifat asam hingga netral. Nikel membentuk kompleks larut dengan ligan bisulfida/sulfida ($\text{HS}^- / \text{H}_2\text{S}$) seperti $\text{Ni}(\text{HS})_2(\text{aq})$, $\text{Ni}(\text{HS})_3^-$, dan $\text{Ni}(\text{HS})^+$. Kompleks ini memiliki stabilitas tinggi dalam rentang temperatur 100-300°C dan mampu mentransport nikel dalam konsentrasi signifikan melalui fluida hidrotermal. Pengendapan nikel sulfida terjadi ketika fluida mengalami pendinginan, *mixing* dengan fluida lain yang kaya besi, atau penurunan pH, yang menyebabkan destabilisasi kompleks bisulfida dan presipitasi mineral seperti pentlandite ($(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$), heazlewoodite (Ni_3S_2) dan millerite (NiS).

Serpentinisasi menghasilkan lingkungan yang tepat untuk mineralisasi. Kombinasi dari pelepasan logam, kondisi reduksi, dan perubahan pH menciptakan “perangkap geokimia” yang sempurna untuk mineralisasi, diantaranya nikel yang dilepaskan akan mengendap sebagai mineral millerit (NiS) atau heazlewoodit (Ni_3S_2). Seringkali, nikel juga menggantikan besi dalam struktur mineral untuk membentuk garnierit, yang merupakan bijih nikel laterit yang penting. Mineralisasi kobalt yang dapat terkonsentrasi dalam mineral seperti kobaltit (CoAsS). Selain itu magnetit (Fe_3O_4) juga bisa menjadi bijih besi yang bernilai ekonomis dalam beberapa kasus. Tak hanya itu, *Platinum Group Elements* (PGE) yang awalnya terdispersi dalam batuan ultramafik dapat dimobilisasi dan terkonsentrasi kembali selama serpentinisasi. Serta emas (Au) Orogenik, dalam beberapa sistem geologi yang lebih besar (orogenik), fluida yang dihasilkan dari proses metamorfisme (yang bisa mencakup dehidrasi batuan serpentin) dianggap sebagai agen pengangkut dan pengendap emas yang penting.

Singkatnya, serpentinisasi memiliki peran utama dalam pembentukan nikel sulfida. Pertama, membebaskan nikel dari mineral silikat primer (olivin), cairan hidrotermal yang kaya ligan (Cl^- , HS^-) merembes melalui batuan ultramafik, dan cairan ini memecah struktur olivin, sehingga melepaskan ion Ni^{2+} . Kedua, membentuk Ikatan Komplek dari Ion Ni^{2+} yang dilepaskan segera ditangkap oleh ligan-ligan tersebut, membentuk kompleks nikel klorida atau nikel-bisulfida yang stabil dan mudah larut. Ketiga, senyawa kompleks nikel yang larut ini kemudian diangkut oleh aliran fluida melalui rekahan dan pori-pori batuan. Kompleks ini menjaga nikel tetap dalam keadaan larutan, mencegahnya untuk mengendap terlalu dini, sehingga dapat tertransport jauh dari sumbernya. Keempat, presipitasi atau pengendapan ketika kondisi berubah dan nikel dilepaskan, memusatkan nikel menjadi tubuh bijih sulfida yang lebih kaya dan lebih besar, baik dengan membentuk sulfida baru maupun memperkaya sulfida yang sudah ada. Mungkin tanpa proses serpentinisasi, banyak endapan nikel sulfida akan tetap tersebar



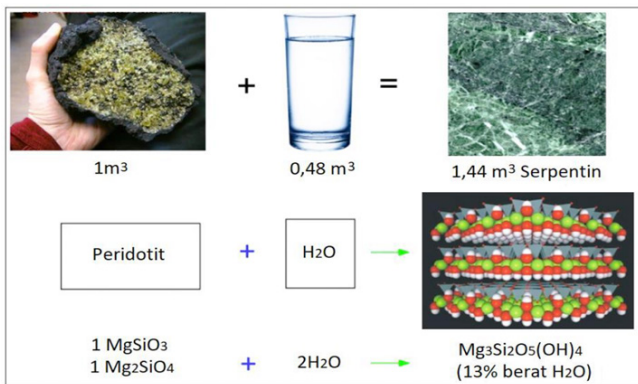
a. Pirhotit, pentlandit, dan kalkopirit mengisi ruang-ruang di antara sudut dari fragmen-fragmen urat kuarsa, *footwall*, dan komatiit. b. Sulfida tersebar pada komatiit yang mengandung sulfida dipisahkan dan ditopang oleh sulfida masif yang bergaris pentlandit dan Pirhotit.

dan tidak bernilai ekonomis. Oleh karena itu, dalam model genetis endapan nikel sulfida, serpentinisasi dipandang sebagai tahap akhir yang menentukan “ekonomis atau tidaknya” sebuah prospek, dengan memobilisasi, mengangkut, dan mengendapkan kembali nikel menjadi bijih yang dapat ditambang.

Ketika terjadi serpentinisasi, kadar nikel justru turun pada serpentin yg dihasilkan. Oleh sebab itu nikel Laterit hasil lapukannya berkadar rendah. Mengapa? Ini terjadi karena perbedaan struktur kristal, olivin dapat menampung nikel dengan baik (subsitusi isomorfik), tetapi serpentin dengan struktur lembaran tidak cocok untuk nikel. Ketidakcocokan kimia ini karena transformasi olivin ke serpentin memaksa nikel keluar karena tidak kompatibel dengan struktur baru. Sehingga nikel yang keluar termobilisasi ke mineral lain, keluar dari sistem kristal dan terkonsentrasi membentuk sulfida, atau tersebar dengan konsentrasi rendah, terbukti di lapangan serpentin massif memiliki kadar nikel rendah, sedangkan zona patahan atau mineralisasi berkadar tinggi.

Beberapa tambang nikel sulfida terbesar dan paling ekonomis di dunia secara genetis terkait dengan proses serpentinisasi:

1. Kambalda Dome, Australia Barat: Contoh klasik di mana akumulasi kristal olivin di



Reaksi peridotit→serpentin. Volume dan mineral yang terlibat pada reaksi serpentinisasi. Gambar kanan bawah menggambarkan susunan atom pada kristal serpentinit. Di sini, Si-tetrahedral abu-abu, membentuk ikatan dengan atom O warna merah, atom Mg hijau, dan atom H putih (Morgan dan Ranero, 2023).

dasar intrusi (kumulat) yang kemudian disusul oleh proses hidrotermal/metamorfisme (biasanya melibatkan serpentinisasi) memekatkan nikel sulfida di sepanjang kontak basal. Ini adalah model *"Komatiite Hosted Nickel Sulfide Deposit"*.

2. Thompson Nickel Belt, Kanada: Sabuk batuan metamorf yang mengandung tubuh batuan ultramafik yang terserpentinisasi dengan endapan nikel sulfida ekonomis.
3. Voisey's Bay, Kanada: Meskipun konteks batuan induknya berbeda (magmatik basa), proses hidrotermal pasca-pembekuan memainkan peran penting dalam pembentukan dan pemekatan bijih.

Potensi Nikel Sulfida Hasil Serpentinisasi di Indonesia

Potensi nikel sulfida hasil serpentinisasi di Indonesia terutama berkembang pada wilayah yang didominasi oleh ofiolit ultramafik dan zona sesar besar yang memungkinkan sirkulasi fluida hidrotermal selama proses serpentinisasi. Secara spasial, potensi utama nikel sulfida terkait serpentinisasi dijumpai di Sulawesi, khususnya di Sulawesi Tengah (Kompleks Ofiolit Sulawesi Tengah) dan Sulawesi Tenggara. Wilayah seperti Morowali, Konawe, Kolaka, dan Bombana memiliki sebaran luas batuan

ultramafik yang telah mengalami serpentinisasi intensif. Selain dikenal sebagai daerah nikel laterit, beberapa zona rekahan dan sesar dalam batuan serpentinit di wilayah ini berpotensi mengandung mineralisasi nikel sulfida primer hingga semi-primer, terutama dalam bentuk *pentlandite*, *millerite*, dan *violarite* yang berasosiasi dengan pirit dan pirhotit.

Di Maluku Utara, khususnya di Halmahera, potensi nikel sulfida hasil serpentinisasi juga berkembang pada sabuk ofiolit Halmahera Timur dan Tengah. Lingkungan tektonik busur ofiolit yang kompleks, dikombinasikan dengan aktivitas sesar dan intrusi mafik ultramafik, menciptakan kondisi yang memungkinkan terjadinya mineralisasi sulfida pada zona serpentinit, meskipun eksplorasi masih relatif terbatas dibandingkan nikel laterit.

Wilayah lain yang memiliki indikasi potensi serupa adalah Papua bagian barat, terutama pada Kepala Burung (Sorong dan Fakfak), di mana batuan ultramafik terserpentinisasi berkembang luas sebagai bagian dari kompleks ofiolit dan zona tumbukan. Proses deformasi tektonik yang intens di kawasan ini mendukung pembentukan jalur fluida hidrotermal yang berpotensi memfasilitasi pengendapan nikel sulfida.

Secara umum, meskipun Indonesia lebih dikenal sebagai produsen nikel laterit, potensi nikel sulfida terkait serpentinisasi tetap signifikan, terutama di wilayah Sulawesi, Maluku Utara, dan Papua Barat. Potensi ini umumnya berskala kecil hingga menengah dan sangat terkontrol oleh struktur geologi, tingkat serpentinisasi, serta interaksi fluida hidrotermal, sehingga memerlukan pendekatan eksplorasi yang berbeda dibandingkan endapan nikel laterit.

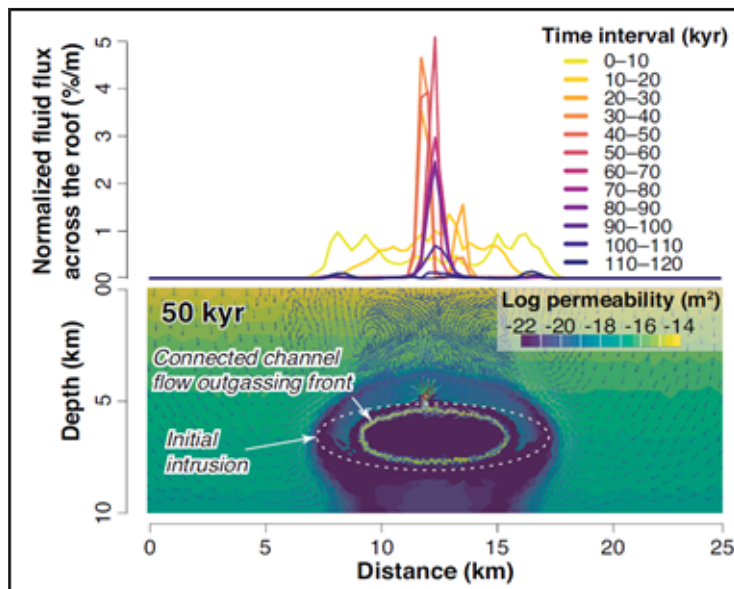
Mengingat proses serpentinisasi menghasilkan juga magnetit, maka kehadiran endapan magnetit di suatu daerah dengan litologi ultramafik dapat menjadi mineral indikator atau *pathfinder*. Demikian juga jika pada suatu daerah berkembang laterit besi, dapat menjadi isyarat berkembangnya alterasi serpentinisasi.

Penulis: Alumna Teknologi Geologi, Angkatan 2022

Peran Non-Condensable Gas (NCG) Pada Pembentukan Endapan Tipe Epitermal dan Porfiri

Oleh: Haikal Malik Fawwaz Sapriana

Non-Condensable Gas (NCG) adalah gelembung gas yang "memberontak" dari perut bumi. NCG terdiri dari CO₂ (60-95%), H₂S (1-15%), N₂, CH₄, argon, NH₃, hingga helium. Yang spesial dari NCG ini, meski didinginkan sampai 20°C, tetap bertahan sebagai fase gas dan tidak berubah menjadi cair. Hal ini sangat berbeda dengan uap air, yakni langsung mengempun menjadi tetesan air.



Pola pelepasan gas pada dapur magma yang jenuh fluida (5 wt % H₂O) pada kedalaman 6,5 km, menunjukkan perkembangan secara bertahap karakter pelepasan gas. Permeabilitas dan struktur aliran fluida dari sistem tersebut menggambarkan kondisi setelah kurun waktu 50 ribu tahun berlangsungnya proses pendinginan magma. (Diadaptasi dari simulasi 1b Lamy-Chappuis dkk., 2020 dalam Michou dan Rottier, 2021).

Asal-usul dan Evolusi NCG dalam Sistem Hidrotermal Epitermal

Secara geokimia, NCG dicirikan oleh kestabilannya terhadap proses kondensasi dibandingkan uap air, sehingga cenderung terpisah sebagai fase gas bebas selama pendinginan dan pendidihan fluida hidrotermal. Sifat ini menyebabkan NCG mampu mempertahankan dan merekam informasi komposisi volatil fluida hidrotermal

purba, menjadikannya indikator penting dalam interpretasi genetik sistem mineralisasi.

Asal-usul NCG dalam sistem epitermal dan porfiri umumnya melibatkan kontribusi dari beberapa sumber utama yang bekerja secara simultan maupun berurutan selama evolusi sistem hidrotermal.

Sumber pertama adalah *degassing* magmatik yang terjadi selama kristalisasi dan pendinginan magma pada temperatur tinggi

(sekitar 900–1.100 °C). Proses ini melepaskan volatil utama seperti CO₂ dan SO₂ ke dalam fluida hidrotermal magmatik. Fluida yang dihasilkan bersifat metalifer (adalah larutan atau cairan yang mengandung konsentrasi logam dalam jumlah yang signifikan), membawa logam-logam seperti Cu dan Au, yang pada tahap awal sistem sering berasosiasi dengan mineral sulfida seperti pirit dan kalkopirit dalam lingkungan porfiri.

Sumber kedua berasal dari reaksi fluida batuan pada temperatur menengah (sekitar 200–300 °C), khususnya interaksi antara fluida hidrotermal dan mineral sulfida besi dalam batuan inang (*hostrock*). Reaksi ini dapat menghasilkan H₂S dalam jumlah signifikan, yang meningkatkan tingkat sulfidasi dari sistem. Lingkungan dengan dominasi H₂S tersebut mendukung pembentukan mineral sulfida tembaga khas *high-sulfidation*, seperti enargit (Cu₃AsS₄) dan kovelit (CuS), yang menjadi indikator zona *High Sulfidation (HS)* dalam sistem hidrotermal.

Sumber ketiga berkaitan dengan proses metamorfisme kontak dan devolatilisasi batuan sedimen, terutama batuan karbonat dan batuan kaya material organik. Pemanasan batugamping (CaCO₃) menghasilkan tambahan CO₂ melalui reaksi dekarbonasi, sementara pemanasan batubara atau sedimen organik dapat menghasilkan CH₄ dan N₂. Proses ini umum terjadi di sekitar zona kontak intrusi dan sering berasosiasi dengan pembentukan mineral metamorf seperti wolastonit dan garnet pada sistem skarn, yang mencerminkan kontribusi fluida non-magmatik terhadap komposisi NCG.

Sumber keempat melibatkan pencampuran fluida magmatik dengan air meteorik, yang memicu terbentuknya sistem konveksi hidrotermal berskala besar. Proses konveksi ini berperan dalam mengangkut NCG dan logam terlarut ke tingkat kerak yang lebih dangkal. Pada kondisi tekanan dan temperatur yang menurun, fluida mengalami pendidihan dan pendinginan, yang mendorong presipitasi mineralisasi epitermal *low-sulfidation*. Produk akhir dari proses ini berupa urat-urat kuarsa yang mengandung adularia, kalsedon, serta

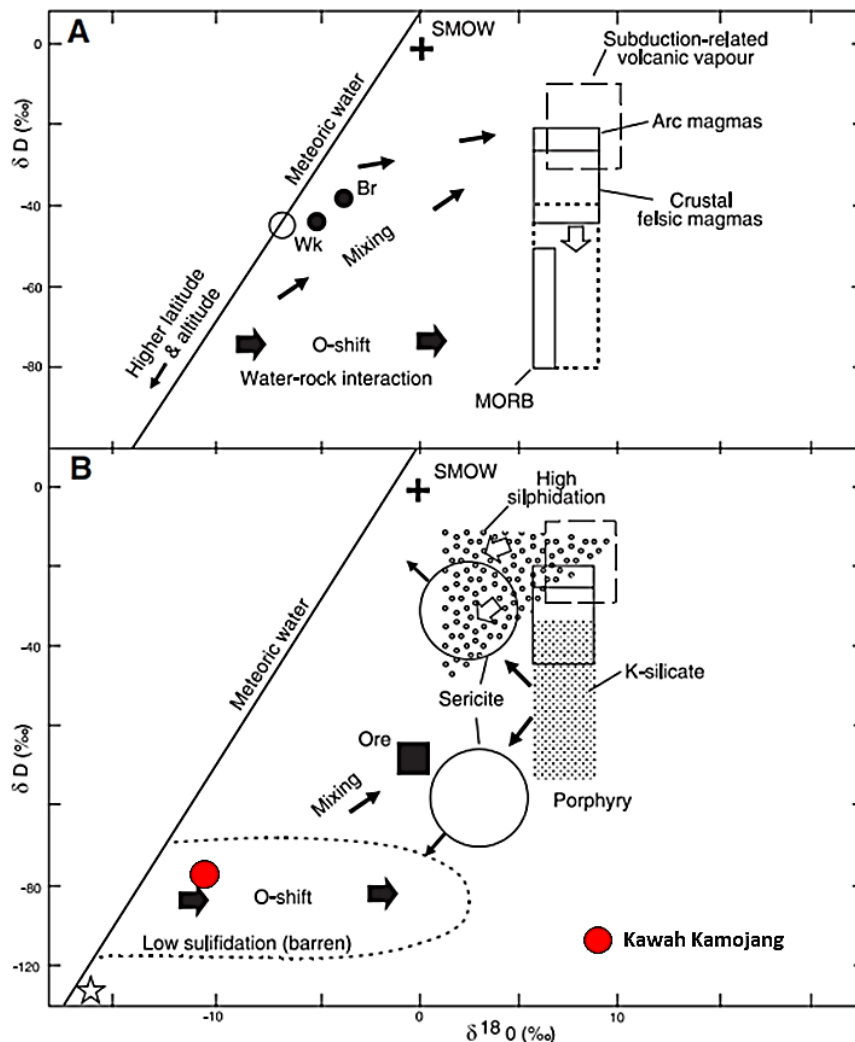
mineral emas-perak dalam bentuk elektum.

Dengan demikian, komposisi NCG yang teramati pada suatu sistem hidrotermal merupakan hasil integrasi dari berbagai sumber volatil dan proses geokimia yang saling berinteraksi. Analisis NCG memungkinkan untuk merekonstruksi evolusi fluida hidrotermal dari tahap magmatik dalam hingga tahap epitermal dangkal, sekaligus memberikan petunjuk penting mengenai tipe sistem mineralisasi dan potensi ekonominya.

Keempat proses geologi utama dalam sistem hidrotermal berperan penting dalam mengontrol transformasi gas non-kondensabel menjadi endapan mineralisasi emas dalam bentuk urat kuarsa. Setiap gelembung NCG membawa informasi geokimia yang dapat dipandang sebagai jejak “sidik genetika geologi” sistem tersebut. Kandungan CO₂ yang tinggi (>80%) merupakan indikator khas sistem epitermal *Low Sulfidation (LS)*, yang umumnya berasosiasi dengan endapan emas yang relatif mudah ditambang, sebagaimana ditunjukkan oleh contoh di Cibaliung, Banten. Sebaliknya, dominasi H₂S pada kisaran 5–20% mencerminkan sistem epitermal HS yang lazim menghasilkan mineralisasi tembaga-emas dengan karakter yang lebih kompleks, seperti di Tumpang Pitu, Banyuwangi.

NCG pada sistem hidrotermal bukan merupakan komponen *inert*, melainkan pembawa informasi geokimia yang merekam sumber fluida, kondisi fisik-kimia, serta tipe sistem mineralisasi. Komposisi NCG umumnya didominasi oleh CO₂ yang dapat mencapai lebih dari 90%, mencerminkan kontribusi fluida magmatik dan kondisi tekanan–temperatur tinggi dalam sistem geotermal. Kehadiran H₂S berperan penting dalam mekanisme transport logam, khususnya emas, melalui pembentukan kompleks Au(HS)₂⁻, serta mengontrol tingkat sulfidasi mineral bijih yang terbentuk.

Gas *inert* seperti N₂ dan argon (Ar) menunjukkan kontribusi fluida atmosferik, sedangkan rasio isotop dan kelimpahan relatifnya dapat mengindikasikan keterlibatan fluida mantel atau pencampuran dengan fluida meteoritik. Metana (CH₄) umumnya berasosiasi dengan interaksi fluida hidrotermal dengan



Contoh isotop gas dari NCG Kawah Kamojang (Suprpto, dkk., 2025), variasi dan kecenderungan $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{D}$ magma dan fluida hidrotermal, pada sistem porfiri dan epitermal Fluida kerak bumi (A). Fluida berhubungan dengan bijih (B) (Hedenquist, 1997 dalam Pirajno, 2009).

batuan sedimen kaya material organik atau batubara, yang sering dijumpai pada bagian perifer (tepi) atau sistem transisi. Kehadiran gas minor seperti NH_3 dan helium (He), khususnya dengan rasio isotop helium yang tinggi, dapat mengindikasikan kontribusi fluida dari kedalaman kerak bawah hingga mantel.

Variasi komposisi dan rasio NCG, terutama CO_2 , H_2S , dan SO_2 , merupakan parameter diagnostik penting dalam membedakan sistem epitermal bertipe *low-sulfidation* yang umumnya mengandung mineralisasi elektrotermal, dari sistem *high-sulfidation* yang dicirikan oleh kondisi oksidatif tinggi dan mineral sulfidasi lanjut seperti enargit. Oleh karena itu, analisis NCG dapat digunakan sebagai vektor

eksplorasi untuk menginterpretasikan tipe sistem hidrotermal dan potensi mineralisasi logam mulia.

Ketika fluida hidrotermal naik menuju kondisi tekanan yang lebih rendah, kandungan *non-condensable gases* (NCG), terutama CO_2 dan H_2S , mengalami pelepasan (*degassing*) akibat penurunan tekanan dan temperatur. Proses *degassing* ini menyebabkan perubahan signifikan pada kondisi fisik-kimia fluida, khususnya pH dan kapasitas pelarutan logam. Disosiasi H_2S menghasilkan ion H^+ dan HS^- , yang meningkatkan keasaman fluida serta mempengaruhi stabilitas kompleks logam terlarut.

Penurunan pH dan perubahan komposisi ligan menyebabkan ketidakstabilan kompleks logam seperti $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ dan kompleks tembaga berbasis klorida (misalnya CuCl_2^-), sehingga kelarutan logam-logam tersebut menurun secara drastis. Akibatnya, terjadi presipitasi logam dalam bentuk mineral sulfida, antara lain pirit (FeS_2) dan kalkopirit (CuFeS_2), serta dalam kondisi tertentu emas dapat terendapkan sebagai emas natif (Au^0). Presipitasi ini umumnya terjadi pada rekahan batuan dan urat kuarsa yang berfungsi sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal.

Proses *degassing* NCG berperan sebagai mekanisme utama pemicu pengendapan bijih dengan cara mengubah keseimbangan kimia fluida secara cepat, sehingga logam-logam terlarut terpisah dari fase fluida dan membentuk akumulasi mineralisasi yang ekonomis. Dengan demikian, NCG memiliki peranan kunci dalam pengendalian distribusi dan intensitas mineralisasi logam mulia dan logam dasar.

Endapan porfiri Cu–Au umumnya terbentuk pada lingkungan tektonik subduksi atau *post-collisional*, pada kedalaman relatif dangkal sekitar 1–4 km, dan berasosiasi dengan intrusi plutonik berkomporsi menengah hingga felsik. Sistem hidrotermal yang berkembang menghasilkan zonasi alterasi konsentris di sekitar tubuh intrusi. Zonasi alterasi klasik meliputi alterasi potasik di bagian inti, diikuti oleh alterasi filik, propilitik, dan argilik ke arah luar.

Dalam konteks tersebut, zona yang dipengaruhi oleh *degassing* NCG menempati posisi transisi yang penting antara alterasi potasik sebagai inti mineralisasi dan alterasi propilitik di bagian pinggiran sistem. Zona ini mencerminkan perubahan gradien fisik-kimia fluida dan sering berkorelasi dengan pengendapan bijih yang signifikan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap peran dan distribusi NCG tidak hanya penting untuk merekonstruksi proses geokimia fluida hidrotermal, tetapi juga memiliki implikasi langsung dalam penentuan vektor eksplorasi dan penargetan zona mineralisasi bernilai ekonomi.

Mekanisme Genetik: Dari Fluida Magmatik hingga Presipitasi yang Dikontrol oleh NCG

Pembentukan *non-condensable gases* dalam sistem hidrotermal merupakan hasil interaksi dinamis antara fluida magmatik, fluida hidrotermal, dan batuan sampling (*wall rock*). Sumber utama fluida dan logam berasal dari fluida metalifer yang dilepaskan oleh magma yang mengalami pendinginan dan kristalisasi pada kedalaman kerak. Fluida ini umumnya kaya akan logam-logam seperti Cu, Au, dan Mo, serta volatil utama berupa Cl^- , CO_2 , dan H_2S , yang berperan sebagai ligan penting dalam transport logam.

Seiring migrasi fluida ke arah atas dan lateral, fluida asam hingga ultra-asam, sering kali diperkaya oleh H_2SO_4 yang terbentuk dari oksidasi H_2S , berinteraksi dengan batuan sampling yang mengandung kation basa seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Fe^{2+} . Batuan yang berperan dalam proses ini meliputi batugamping, batuan mafik-intermediet, serta mineral silikat kaya kalsium seperti plagioklas. Interaksi tersebut menghasilkan reaksi penetralan yang mengurangi keasaman fluida, sebagaimana dicontohkan oleh reaksi antara plagioklas kalsik dan fluida asam yang menghasilkan mineral karbonat dan mineral aluminosilikat sekunder.

Namun demikian, pada zona yang didominasi oleh NCG, alterasi yang berkembang umumnya dicirikan oleh kelimpahan mineral karbonat dibandingkan mineral lempung. Kondisi ini menunjukkan pasokan kation basa yang besar dari batuan sampling dan/atau keterbatasan aktivitas silika dalam sistem. Kandungan CO_2 yang tinggi dalam fluida, baik yang berasal langsung dari magma maupun dari pelarutan batuan karbonat tua di basement, merupakan faktor pengontrol utama dalam perkembangan zona ini. Penurunan suhu dan tekanan selama kenaikan fluida menyebabkan CO_2 terlepas dari larutan (*exsolution*), yang selanjutnya meningkatkan pH fluida dan mendorong pengendapan kalsit dan/atau dolomit secara masif.

Hubungan antara zona NCG dan pengayaan emas bersifat sistematis dan telah

terdokumentasi pada berbagai endapan kelas dunia. Asosiasi spasial antara zona NCG dan interval berkadar emas tinggi, seperti yang dilaporkan pada endapan Batu Hijau (Indonesia) dan Cadia Hill (Australia), menunjukkan bahwa NCG memainkan peran penting dalam mekanisme pengendapan emas. Secara umum, terdapat dua model utama yang menjelaskan peran NCG dalam menjebak emas dari fluida hidrotermal.

Model pertama melibatkan destabilisasi kompleks bisulfida emas. Dalam sistem hidrotermal, emas umumnya diangkut sebagai kompleks bisulfida, seperti $\text{Au}(\text{HS})_2^-$. Pembentukan mineral karbonat di zona NCG mengubah keseimbangan kimia fluida, baik melalui konsumsi CO_2 maupun perubahan pH, sehingga menurunkan stabilitas kompleks bisulfida tersebut. Akibatnya, emas terpresipitasi sebagai emas natif atau elektum.

Model kedua berkaitan dengan proses pendidihan (*boiling*) atau pemisahan fase fluida yang diinduksi oleh penurunan kandungan CO_2 terlarut. Dekarbonasi atau pengendapan karbonat pada zona NCG mengurangi kelarutan CO_2 dalam fluida, yang memicu terbentuknya fase uap. Dalam kondisi ini, H_2S yang berperan penting dalam menjaga kelarutan emas, cenderung terpartisi ke fase uap. Kehilangan H_2S dari fase cair secara signifikan menurunkan kelarutan emas dan menyebabkan presipitasi emas secara cepat.

Mekanisme ini menjelaskan keberadaan emas mikroskopis yang sering dijumpai berasosiasi dengan urat-urat halus karbonat dan mineral klorit pada zona NCG. Dengan demikian, NCG berfungsi sebagai elemen kunci dalam pengontrolan kondisi fisik-kimia fluida hidrotermal, yang pada akhirnya menentukan tipe sistem epitermal serta mekanisme pengendapan emas yang dominan.

Peran CO_2 Tinggi dan *Boiling* dalam Pembentukan Endapan Epitermal *Low-Sulfidation*

Pada sistem hidrotermal epitermal bertipe *low-sulfidation*, pelepasan CO_2 dari fase fluida selama proses pendidihan (*boiling*) memainkan peran penting dalam pengendalian

kondisi kimia fluida pada kedalaman dangkal, umumnya kurang dari ± 500 m di bawah permukaan. Eksolusi CO_2 dari fluida menyebabkan sistem karbonat-bikarbonat berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) pH, sehingga pH fluida relatif stabil pada kisaran netral hingga sedikit asam (sekitar pH 6-7).

Kondisi pH yang relatif netral tersebut sangat mendukung kestabilan dan presipitasi emas-perak dalam bentuk *electrum*, umumnya dengan rasio Au:Ag sekitar 80:20. Pada lingkungan ini, emas dan perak terendapkan bersamaan dengan kuarsa berbutir halus dan mineral adularia, membentuk urat-urat hidrotermal yang berkembang pada zona rekahan batuan. Asosiasi mineral kuarsa-adularia-elektum merupakan ciri khas sistem epitermal *low-sulfidation* yang terbentuk pada kondisi suhu menengah hingga rendah dan tekanan dangkal.

Proses pendidihan yang dikontrol oleh pelepasan CO_2 juga menyebabkan penurunan kelarutan ligan sulfur (terutama H_2S) dalam fase cair, sehingga menurunkan kapasitas fluida untuk mempertahankan emas dalam bentuk kompleks terlarut. Akibatnya, emas dan perak terpresipitasi secara efisien dalam interval vertikal yang relatif sempit, menghasilkan kadar emas yang tinggi, umumnya berkisar antara 5 hingga 20 g/t Au.

Contoh klasik dari sistem ini adalah endapan McLaughlin di California Utara, yang merupakan endapan epitermal *low-sulfidation* bertipe *hot-spring*. Endapan tersebut ditambang dengan metode *open pit* antara tahun 1985 hingga 2002 dan menghasilkan lebih dari 3,4 juta ons emas. Karakteristik utama endapan ini meliputi kedalaman mineralisasi yang relatif dangkal, dominasi urat kuarsa-adularia, kandungan elektum yang signifikan, serta kondisi penambangan yang relatif sederhana.

Keberadaan zona fluida dengan kandungan CO_2 tinggi pada sistem epitermal *low-sulfidation* dengan demikian merupakan indikator penting bagi lingkungan hidrotermal yang kondusif terhadap pengendapan emas berkadar tinggi, serta memiliki implikasi langsung dalam penentuan target eksplorasi

**Tabel komposisi gas di Kawah Kamojang, Garut (Suprpto, dkk., 2025)
mengindikasikan lingkungan low-sulfidation**

Kode sampel	Non-Condensable Gas (% mmol)								
	CO ₂	H ₂ S	NH ₃	He	O ₂	Ar	N ₂	CH ₄	CO
KMJ	84,07	2,91	0,84	t. d	t. d	0,16	10,52	1,04	t. d

yang ekonomis.

Peran Dominasi H₂S dalam Sistem Epitermal *High-Sulfidation*

Pada sistem hidrotermal epitermal bertipe *high-sulfidation* (HS), dominasi H₂S dalam NCG menghasilkan kondisi fluida yang sangat asam, dengan pH umumnya berkisar antara 2 hingga 3. Keasaman tinggi ini terutama disebabkan oleh oksidasi H₂S menjadi asam sulfat (H₂SO₄), yang secara efektif meningkatkan agresivitas kimia fluida hidrotermal terhadap batuan inang. Fluida asam-oksidatif tersebut menyebabkan pelindian intensif terhadap komponen silikat dan karbonat batuan, menghasilkan kehancuran mineral primer dan membentuk tekstur alterasi yang khas.

Lingkungan geokimia tersebut mendukung pembentukan mineral sulfida tembaga khas *high-sulfidation*, seperti enargite (Cu₃AsS₄) dan kovelit (CuS), yang umumnya berasosiasi dengan alterasi argilik lanjut (*advanced argillic alteration*). Selain itu, mineral sulfat seperti alunit sering terbentuk secara masif dan berasosiasi dengan kuarsa residu. Pelindian selektif oleh fluida asam menghasilkan tekstur *vuggy quartz*, yang dicirikan oleh kuarsa berpori akibat hilangnya mineral-mineral yang lebih reaktif terhadap asam.

Meskipun kondisi kimia fluida sangat agresif, sistem epitermal *high-sulfidation* tetap mampu menghasilkan kadar emas yang signifikan, sering kali mencapai atau melebihi 10 g/t Au pada zona-zona tertentu. Namun, karakteristik mineralogi dan geokimia bijih pada sistem ini menimbulkan tantangan teknis yang lebih besar dalam proses penambangan dan pengolahan, terutama akibat kehadiran

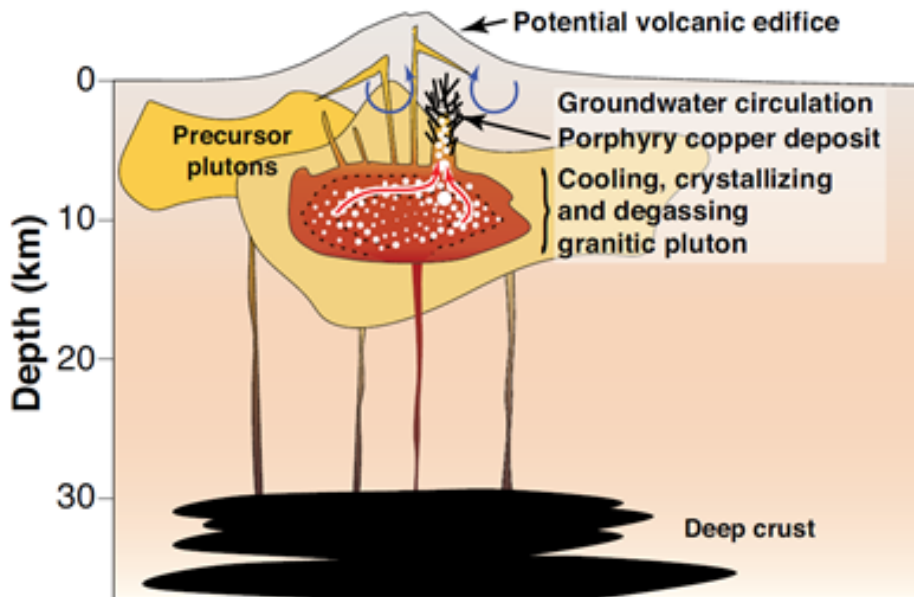
mineral tembaga-arsenik dan kandungan sulfur yang tinggi.

Endapan Yanacocha di Peru merupakan contoh klasik sistem epitermal *high-sulfidation* berskala dunia. Terletak pada ketinggian sekitar 4.000 m di Pegunungan Andes, endapan ini telah memproduksi lebih dari 40 juta ons emas sejak awal operasi pada tahun 1993. Metode ekstraksi yang diterapkan meliputi *heap leaching* skala besar dan pengolahan lanjutan menggunakan teknologi *autoclave*, yang dirancang untuk mengatasi kompleksitas mineralogi dan sifat refraktori bijih.

Perbandingan antara sistem epitermal *low-sulfidation* dan *high-sulfidation* menunjukkan bahwa komposisi NCG, khususnya rasio relatif CO₂ terhadap H₂S, merupakan parameter kunci dalam mengidentifikasi tipe sistem hidrotermal dan potensi mineralisasinya. Zona yang didominasi CO₂ umumnya berasosiasi dengan sistem *low-sulfidation* yang lebih netral dan relatif mudah ditambang, sedangkan dominasi H₂S mencirikan sistem *high-sulfidation* yang bersifat sangat asam dan teknis lebih menantang. Oleh karena itu, analisis gas pada manifestasi panas bumi atau fluida hidrotermal dapat digunakan sebagai alat eksplorasi awal yang efektif untuk membedakan lingkungan mineralisasi dan mengoptimalkan strategi eksplorasi sebelum kegiatan pengeboran dilakukan.

Peran NCG dalam Pembentukan Endapan Tembaga-Emas Tipe Porfiri

NCG, terutama CO₂, SO₂, H₂S, N₂, dan H₂, merupakan komponen penting dalam sistem hidrotermal magmatik yang membentuk



Penampang skematis pada sistem tembaga porfiri transkrustal aktif, yaitu sistem magmatik yang menembus seluruh ketebalan kerak bumi dan masih menunjukkan aktivitas tektonik atau magmatik hingga saat ini (Michou dan Rottier, 2021).

endapan tembaga-emas tipe porfiri. Gas-gas ini dilepaskan dari magma selama proses diferensiasi dan penurunan tekanan, serta berperan signifikan dalam mengontrol evolusi fluida magmatik-hidrotermal, termasuk tekanan fluida, kondisi redoks, pH, pemisahan fasa, dan mekanisme transport serta pengendapan logam.

Pada tahap awal evolusi sistem porfiri, pelepasan NCG dari magma mendahului eksolusi air karena kelarutan gas-gas tersebut lebih rendah dibandingkan H_2O . Proses *degassing* ini menurunkan kelarutan air dalam magma dan memicu eksolusi fluida magmatik yang kaya logam. Kehadiran NCG meningkatkan volume fluida dan menyebabkan terbentuknya tekanan berlebih (*overpressure*) di dalam tubuh intrusi porfiri. Kondisi ini mendorong pembentukan rekahan dan sistem urat *stockwork* yang menjadi jalur utama untuk lewatnya migrasi fluida pembawa tembaga dan emas.

NCG juga berperan penting dalam mengontrol kondisi redoks dan spesiasi sulfur dalam fluida hidrotermal. Pada kedalaman

dan temperatur tinggi, sulfur umumnya hadir sebagai SO_2 dalam kondisi oksidatif. Selama fluida naik dan mendingin, SO_2 mengalami reaksi disproporsionasi menjadi H_2S dan H_2SO_4 . Pembentukan H_2S meningkatkan kapasitas fluida untuk mengangkut tembaga dan emas sebagai kompleks sulfida, khususnya $Cu-Cl$ dan $Au-HS^-$, sedangkan H_2SO_4 berkontribusi terhadap perkembangan alterasi asam seperti alterasi filik.

Proses pemisahan fasa fluida (*boiling* atau *immiscibility*) yang dipicu oleh NCG merupakan mekanisme utama pengendapan logam dalam sistem porfiri. Pelepasan gas dan perubahan tekanan menyebabkan destabilitas kompleks logam, sehingga tembaga mengendap sebagai mineral sulfida (misalnya kalkopirit dan bornit), sementara emas mengendap akibat hilangnya H_2S dari fluida. Selain itu, pemisahan antara *brine* dan fasa uap kaya gas menyebabkan diferensiasi logam secara vertikal, di mana tembaga lebih terkonsentrasi pada zona porfiri bagian dalam, sedangkan emas dapat terbawa ke tingkat yang lebih dangkal dan berasosiasi dengan sistem epitermal.

Dengan demikian, *non-condensable gases* tidak hanya berfungsi sebagai komponen pasif dalam fluida magmatik, tetapi merupakan pengendali utama dinamika sistem hidrotermal porfiri. Perannya mencakup pengaturan tekanan dan rekahan, evolusi redoks dan kimia fluida, pemisahan fasa, serta mekanisme transport dan pengendapan tembaga-emas. Keberadaan dan evolusi NCG menjadi faktor fundamental dalam pembentukan, zonasi, dan potensi ekonomi endapan tembaga-emas tipe porfiri.

Rekontekstualisasi Peran NCG sebagai Proksi Geokimia dalam Prediksi Tipe Mineralisasi

Peran *non-condensable gases* (NCG) dalam sistem hidrotermal dapat direkonseptualisasi sebagai parameter geokimia kunci untuk menginterpretasikan sinyal volatil magmatik dan memprediksi tipe mineralisasi yang berkembang. Paradigma ini didasarkan pada prinsip bahwa komposisi gas residual yang terperangkap dan terekam dalam zona alterasi yang dikontrol oleh NCG, khususnya rasio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ yang merepresentasikan karakter fisik-kimia fluida hidrotermal purba yang bertanggung jawab atas pembentukan endapan bijih.

Pada sistem epitermal bertipe *low-sulfidation* (LS), seperti yang terdokumentasi pada endapan McLaughlin, Amerika Serikat, fluida hidrotermal umumnya didominasi oleh CO_2 , yang dapat melebihi 80% dari total volatil, dengan kandungan H_2S yang relatif rendah (umumnya <5%). Komposisi fluida tersebut mencerminkan kondisi redoks yang relatif tereduksi dan pH yang mendekati netral, sehingga mendukung stabilitas kompleks bisulfida emas $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ sebagai mekanisme utama transport logam. Alterasi NCG pada sistem ini dicirikan oleh karbonatisasi intensif dengan pembentukan kalsit masif, yang kemudian diikuti oleh perkembangan urat-urat kuarsa-adularia yang mengandung emas-perak dalam bentuk elektorium.

Sebaliknya, pada sistem epitermal bertipe *high-sulfidation* (HS), seperti endapan Yanacocha di Peru, fluida hidrotermal dicirikan

oleh kandungan H_2S yang lebih tinggi (sekitar 5-20%) dan sering kali disertai oleh SO_2 . Komposisi volatil tersebut mencerminkan kondisi sistem magmatik yang lebih teroksidasi dan menghasilkan fluida sangat asam. Dalam lingkungan ini, alterasi yang berkembang didominasi oleh pelindian asam intensif, menghasilkan tekstur *vuggy quartz* dan mineral sulfida tembaga khas *high-sulfidation*, seperti enargit (Cu_3AsS_4). Alterasi yang dikontrol oleh NCG berupa karbonatisasi hanya berkembang secara terbatas di bagian perifer sistem, di mana keasaman fluida telah dinetralkan oleh interaksi dengan batuan sampling.

Dari sudut pandang eksplorasi, NCG memiliki implikasi praktis yang signifikan sebagai alat prediksi awal tipe sistem mineralisasi. Analisis komposisi gas dari sumur panas bumi, manifestasi hidrotermal, atau inklusi fluida yang berasosiasi dengan zona alterasi NCG dapat dilakukan dengan biaya relatif rendah dibandingkan dengan pengeboran eksplorasi. Penentuan rasio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ memberikan dasar pengambilan keputusan yang kuat: rasio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ yang tinggi mengindikasikan potensi sistem LS yang umumnya lebih kondusif terhadap mineralisasi emas dengan metode penambangan dan pengolahan yang relatif sederhana, sedangkan rasio yang rendah mengarah pada sistem HS yang secara teknis lebih kompleks dan memerlukan teknologi ekstraksi lanjutan.

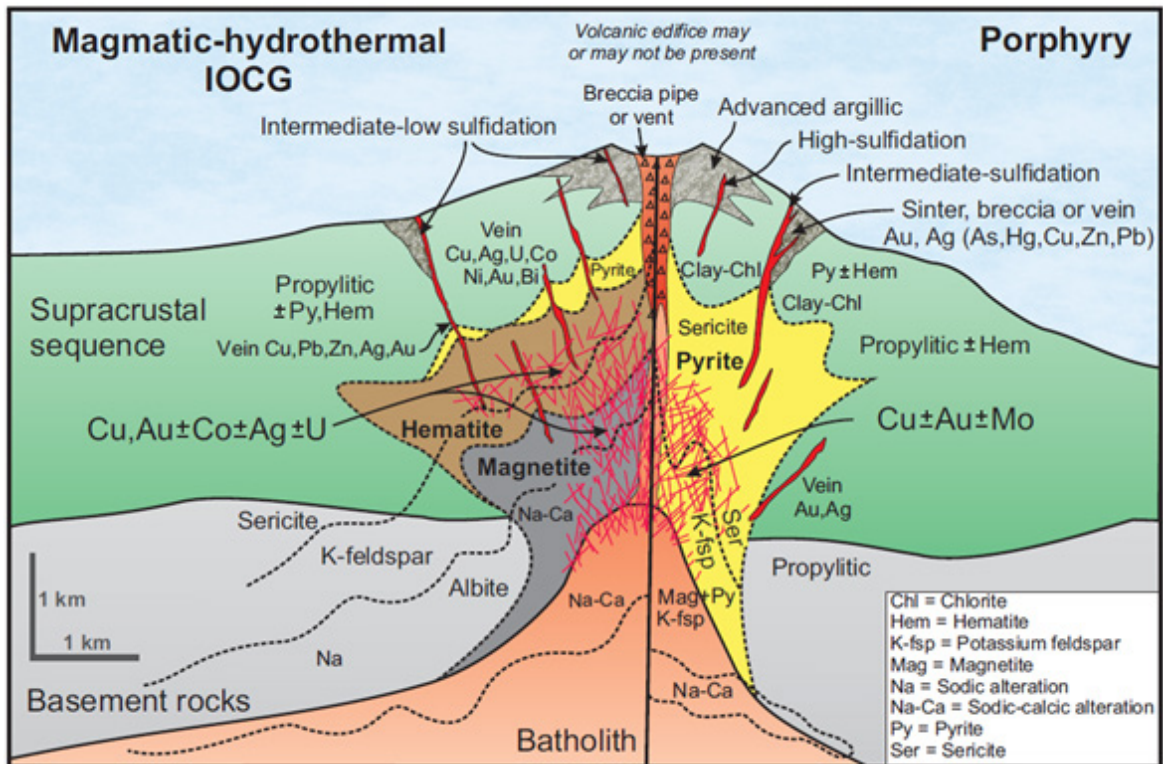
Tanpa pemanfaatan informasi NCG, kegiatan eksplorasi berisiko dilakukan secara kurang terarah, sehingga meningkatkan kemungkinan kegagalan pengeboran dan biaya eksplorasi yang signifikan. Oleh karena itu, pemahaman dan integrasi data NCG ke dalam model genetik dan strategi eksplorasi tidak hanya berkontribusi pada rekonstruksi proses geologi, tetapi juga berperan penting dalam pengelolaan risiko teknis dan ekonomi pada tahap awal eksplorasi mineral.

Penulis: Mahasiwa Teknologi Geologi,
Angkatan 2024

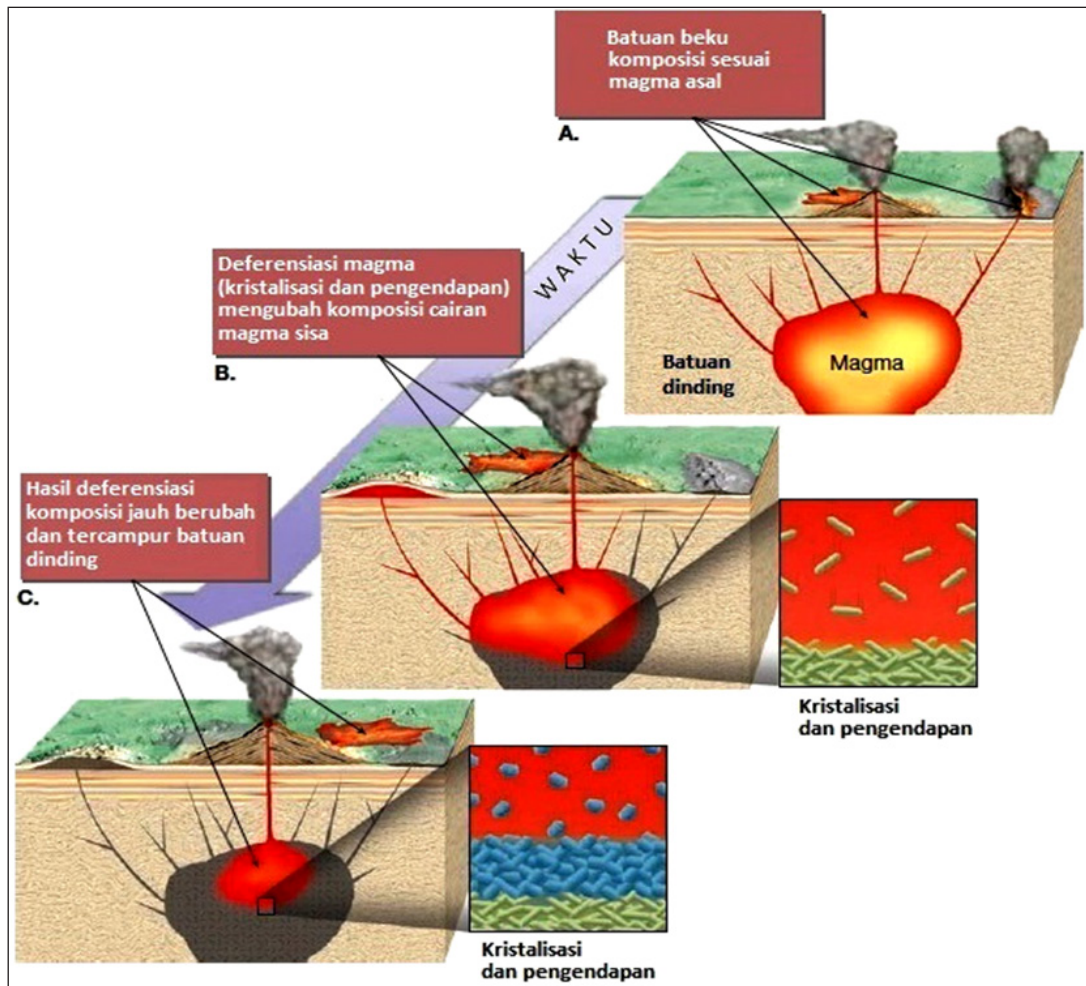
Akhir Evolusi Magma Silikat Berpisah dengan Logam

Oleh: Rangga Aura Ramadhan

Berawal dari magma sumber yg sama, akhirnya ketika berevolusi dan bermigrasi, mineral-mineral silikat dan logam bisa berpisah jalan menghasilkan zona berkumpulnya logam. Perpishan tersebut akibat dari dua sifat utama logam yaitu bersifat tidak kompatibel dan *immiscibel*. Unsur yang tidak kompatibel (*incompatible*) adalah unsur yang tidak cocok masuk ke dalam struktur kristal mineral mayor (seperti silikat) saat magma mengkristal. Sedangkan sifat *immiscible*, dua fase cair tidak bisa saling bercampur homogen, meskipun berada dalam magma yang sama, menjadi terpisah seperti minyak dan air.



Akhir evolusi magma menghasilkan beberapa zona tipe endapan logam dari jenis logam yang bersifat tidak kompatibel. Model skematis untuk sistem magmatik-hidrotermal yang menggambarkan hubungan antara endapan porfiri Cu ± Mo ± Au yang kaya S (sisi kanan) dan endapan oksida besi-tembaga-emas magmatik-hidrotermal (MH-IOCG) yang miskin S (sisi kiri). Transisi mineral hidrotermal dan jejak spasial relatif ditunjukkan oleh transisi albite-K-feldspar, K-feldspar-serisit, dan magnetit-hematit. *Overprinting* antara *prograde* dan *retrograde* dari himpunan alterasi dan mineralisasi umum terjadi (Richards dan Mumin, 2013).



Perubahan komposisi magma: A. Magma dan batuan beku yang terbentuk mempunyai komposisi sama; B. Pendinginan magma diikuti proses deferensiasi menghasilkan kristalisasi dan pengendapan mineral, menyebabkan komposisi cairan magma yang tersisa berubah; C. Hasil deferensiasi lanjut dan terjadi pencampuran dengan lelehan batuan sekitarnya (modifikasi dari Lutgens dan Tarbuck, 2012).

Evolusi magma merupakan proses perubahan komposisi kimia dan fisik magma dari kondisi awal hingga membeku menjadi batuan beku, yang melibatkan berbagai mekanisme geokimiawi. Proses ini dimulai dari pembentukan magma melalui pelelehan parsial batuan mantel atau kerak bumi akibat panas geotermal, dekompresi, atau penambahan fluida atau air. Selama perjalanan naik menuju ke arah permukaan, magma mengalami modifikasi yang menghasilkan keragaman batuan beku seperti basalt hingga granit bahkan sebagian

magma menghasilkan deposit bijih.

Proses diferensiasi magma adalah tahap utama dalam evolusi, di mana magma homogen berubah menjadi massa dengan komposisi bervariasi melalui pemisahan mineral. Mekanisme kunci termasuk kristalisasi fraksional, di mana mineral awal seperti olivin mengkristal dan tenggelam karena gravitasi, sehingga memperkaya residu magma cair dengan silika. Proses lain mencakup pencampuran magma (*magma mixing*) dari sumber berbeda dan asimilasi batuan dinding yang meleleh ke dalam magma.

Komposisi awal magma sangat menentukan arah evolusinya, karena magma basaltik kaya besi dan magnesium cenderung menghasilkan batuan mafik, sementara yang andesitik menghasilkan intermediet. Suhu dan tekanan memengaruhi viskositas serta titik leleh. Magma suhu tinggi menurunkan viskositas memungkinkan aliran mudah, sedangkan tekanan tinggi mencegah eksolusi volatil.

Kandungan volatil seperti H_2O dan CO_2 menurunkan titik leleh dan viskositas magma, memfasilitasi kristalisasi dan pendinginan. Laju pendinginan memengaruhi derajat diferensiasi. Pendinginan lambat di kedalaman memungkinkan kristal besar terbentuk dan fraksionasi lengkap, menghasilkan batuan plutonik kasar. Sebaliknya, pendinginan cepat di permukaan menghasilkan tekstur halus atau gelas pada batuan vulkanik. Faktor-faktor ini saling berinteraksi, di mana penurunan tekanan menyebabkan eksolusi volatil yang memicu kristalisasi *isothermal* dan perubahan viskositas mendadak. Evolusi magma akhirnya menentukan gaya erupsi, dari efusif hingga eksplosif.

Mineral Silikat dalam Sistem Magmatik

Mineral silikat utama dalam magma mencakup olivin, piroksen, amfibol, biotit, feldspar, dan kuarsa, yang semuanya membentuk struktur kristal berdasarkan tetrahedron SiO_4 sebagai unit dasar.

- **Olivin** $(Mg,Fe)_2SiO_4$ termasuk nesosilikat dengan tetrahedron terisolasi, mengkristal pertama pada suhu tinggi di atas $1200^\circ C$ dalam magma mafik, memiliki kekerasan 6,5-7 dan warna hijau zaitun hingga hitam, serta rentan terhadap pelapasan menjadi serpentin.
- **Piroksen** seperti enstatit $MgSiO_3$ atau augit $(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$ memiliki struktur rantai tunggal inosilikat ($Si:O = 1:3$), umum di batuan basalt dan gabro dengan sudut celah 90° , warna hitam hingga hijau tua, dan stabil pada suhu $1100-1200^\circ C$.
- **Amphibole** seperti hornblende $(Ca,Na)_2$

$(Mg,Fe,Al)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2$ menunjukkan struktur rantai ganda inosilikat ($Si:O = 4:11$) dengan sudut celah $60^\circ/120^\circ$, kaya volatil air sehingga membutuhkan kondisi hidrotermal, berwarna hitam hingga cokelat, dan dominan di batuan andesit serta diorit.

- **Biotit** $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ adalah filosilikat berlapis dengan struktur lembar ($Si:O = 2:5$), bersifat sempurna kleavabel, berwarna hitam hingga cokelat gelap, kaya besi-magnesium, dan mengkristal pada suhu menengah sekitar $800-900^\circ C$ di magma felsik-menengah.
- **Feldspar** terdiri dari alkali seperti ortoklas $KAlSi_3O_8$ dan plagioklas $(Na,Ca)AlSi_3O_8$, keduanya tekto silikat dengan kerangka 3D ($Si:O = 1:2$), paling melimpah di kerak bumi hingga 60%, berwarna putih hingga merah muda, dan stabil hingga suhu rendah $700^\circ C$.
- **Kuarsa** SiO_2 murni sebagai tekto silikat terakhir mengkristal pada suhu di bawah $600^\circ C$, tidak berbelang, transparan hingga buram, dan mendominasi batuan riolit serta granit.

Mineral silikat berperan sebagai penyusun utama magma karena menyumbang lebih dari 90% volume batuan beku di kerak bumi, mengontrol komposisi kimia seperti kandungan SiO_2 yang meningkat dari basalt (50%) ke riolit (70%). Saat kristalisasi fraksional, mineral mafik seperti olivin dan piroksen mengendap dini, memperkaya residu dengan silika dari kuarsa dan feldspar, sehingga menentukan jenis batuan akhir sesuai seri reaksi Bowen. Kehadiran mineral ini juga memengaruhi viskositas magma, di mana piroksen dan amfibol menurunkan viskositas pada tahap awal, sementara feldspar dan kuarsa meningkatkannya saat pendinginan lanjut. Volatil dalam amfibol dan biotit seperti OH^- memfasilitasi erupsi vulkanik dengan menurunkan titik leleh. Secara keseluruhan, susunan mineral silikat mencerminkan evolusi magma dari mantel hingga permukaan, seperti terlihat pada busur vulkanik Indonesia.

Proses Kristalisasi Fraksional

Kristalisasi fraksional didefinisikan sebagai proses diferensiasi magma di mana kristal mineral yang terbentuk lebih dulu dipisahkan dari lelehan asal, sehingga mengubah komposisi kimia magma yang tersisa. Proses ini terjadi ketika pendinginan magma menyebabkan mineral dengan titik leleh tinggi mengkristal terlebih dahulu dan terpisah sebelum bereaksi lebih lanjut dengan cairan magma. Menurut Norman L. Bowen, kristalisasi fraksional menjadi mekanisme utama pembentukan keragaman batuan beku dari magma induk yang homogen. Hal ini membedakannya dari kristalisasi kesetimbangan, di mana kristal tetap berinteraksi dengan lelehan hingga akhir proses. Dalam geologi petrologi, proses ini menjelaskan variasi komposisi batuan seperti dari basalt menjadi riolit.

Urutan kristalisasi mineral mengikuti Deret Reaksi Bowen, yang membagi mineral silikat menjadi dua cabang utama berdasarkan suhu kristalisasi dan reaktivitasnya. Deret kontinu mencakup olivin yang mengkristal pertama pada suhu tinggi sekitar 1200°C, diikuti piroksen, amfibol, dan biotit, sementara deret diskontinu dimulai dengan plagioklas kalsik (anortit) yang bertukar kation natrium. Olivine, sebagai mineral mafik terkaya besi dan magnesium, mengendap awal dan bereaksi membentuk piroksen, yang selanjutnya bereaksi menjadi amfibol. Pada suhu lebih rendah, mineral felsik seperti kuarsa dan K-feldspar mengkristal terakhir dari lelehan yang kaya silika. Deret ini menunjukkan bagaimana pendinginan bertahap menghasilkan pemisahan mineral secara berturut-turut.

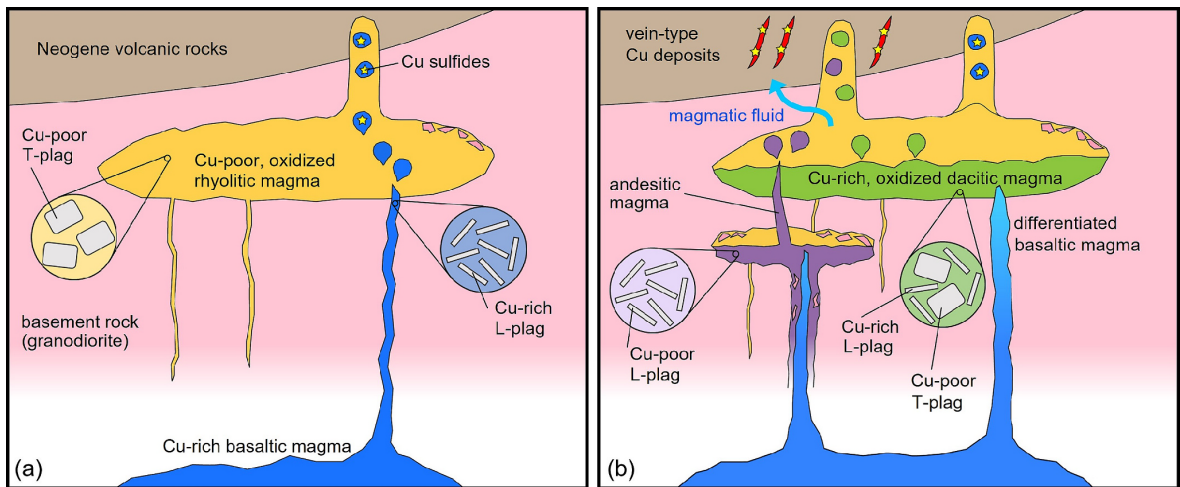
Mekanisme pemisahan kristal dari lelehan magma meliputi pengendapan gravitasi, flotasi kristal, dan filter-pressing, yang masing-masing bergantung pada densitas relatif dan dinamika fluida. Pengendapan gravitasi terjadi ketika kristal lebih padat daripada magma, seperti olivin yang tenggelam ke dasar ruang magma sesuai hukum Stokes, membentuk kumulasi kristal di bagian bawah. Sebaliknya, flotasi kristal berlaku untuk mineral ringan seperti

plagiosklas yang mengapung ke permukaan karena kepadatan lebih rendah. *Filter-pressing* melibatkan tekanan mekanis yang memeras lelehan residu melalui celah antar kristal, mirip penyaringan, terutama pada intrusi plutonik di bawah tekanan litosfer. Ketiga mekanisme ini diperkuat oleh konveksi magma yang meningkatkan segregasi.

Kristalisasi fraksional secara signifikan mengubah komposisi magma sisa melalui pengayaan unsur tidak kompatibel dan pengurangan unsur kompatibel, menghasilkan evolusi dari magma mafik ke felsik. Ketika kristal mafik seperti olivin dan piroksen terpisah, magma residu menjadi kaya silika, alkali, dan air, memungkinkan pembentukan batuan riolitik dari basalt awal. Dampak ini juga memengaruhi unsur jejak, di mana unsur seperti zirkon dan REE terkonsentrasi pada lelehan akhir, membentuk pegmatit. Perubahan ini menjelaskan asosiasi batuan beku dalam *suite* komposisi tunggal di satu pluton. Selain itu, peningkatan viskositas magma residu menghambat konveksi dan memicu letusan eksplosif. Studi isotop dan geokimia modern mengonfirmasi dampak ini pada diferensiasi kerak bumi.

Tahap Akhir Evolusi Magma

Perubahan komposisi magma menuju fase akhir terjadi melalui proses diferensiasi magmatik, di mana kristalisasi bertahap memisahkan mineral-mineral mafik seperti olivin dan piroksen, sehingga menyisakan cairan yang semakin kaya silika. Proses ini sering kali dipercepat oleh *magma mixing*, di mana magma primitif bercampur dengan magma yang telah berevolusi, menghasilkan tekstur kompleks pada fenokris yang menandakan fluktuasi suhu dan komposisi. Pada tahap akhir, magma menunjukkan afinitas *calc-alkaline* tinggi, seperti terlihat pada intrusi di Jawa yang mengalami diferensiasi intens di tahap akhir. Fraksionasi kristal menyebabkan peningkatan indeks felsik, mengubah magma basaltik menjadi lebih asam sesuai klasifikasi Thornton dan Tuttle. Evolusi ini tidak hanya terjadi di akhir, tetapi dimulai sejak pembentukan kristal awal, meskipun



Contoh akibat dari *magma mixing* menghasilkan mineralisasi tembaga. Model pembentukan endapan Cu di Arakawa, Jepang dan sistem magmatik terkait. (a) Tahap awal sistem magmatik Arakawa tanpa mineralisasi Cu. (b) Tahap selanjutnya dari sistem magmatik Arakawa disertai mineralisasi Cu. Keterangan: L, berbentuk pipih; plag, plagioklas; T, berbentuk lempeng/tabuler (Satori, dkk., 2025)

puncaknya di fase terminal.

Pembentukan magma kaya silika dan volatil merupakan hasil akhir dari vesikulasasi dan *flux melting*, di mana gas seperti H_2O , CO_2 , dan SO_2 terlepas sebagai gelembung, membawa unsur-unsur alkali seperti Na dan K ke fase cairan sisa. Magma riolitik, dengan kandungan SiO_2 65-75%, memiliki viskositas tinggi dan kadar Fe, Mg, Ca rendah, sementara K dan Na meningkat signifikan. Proses ini mirip dengan evolusi magma sekunder yang mengalami asimilasi batuan dinding atau hibridisasi. Volatil ini menurunkan titik leleh batuan, memungkinkan pembentukan magma baru yang lebih asam di kedalaman kerak bumi. Pada akhir pembekuan, sisa cairan menjadi larutan hidrotermal yang kaya gas dan logam terlarut.

Peran fluida magmatik dalam mobilisasi unsur logam sangat krusial, karena fluida volatil dari magma akhir melarutkan logam seperti Cu, Au, dan Mo, kemudian memindahkannya melalui retakan batuan. Fluida ini bersifat imisibel, memisahkan menjadi fase cair kaya air dan gas yang membentuk endapan mineral epigenetik setelah intrusi. Mobilisasi terjadi melalui segregasi dan injeksi pada fase magmatik cair, menghasilkan mineral seperti

kromit dan titamagnetit melalui *gravitational settling*. Unsur jejak seperti Rb, Ba, Sr, dan Pb ikut tertransport, berkontribusi pada pembentukan cebakan logam singenetik atau epigenetik. Proses ini menjelaskan asosiasi pegmatit dan greisen dengan magma riolitik.

Transisi dari sistem magmatik ke hidrotermal ditandai oleh pemisahan fluida sisa magma yang tidak lagi menyatu karena imisibilitas, memicu pembentukan larutan hidrotermal pada akhir kristalisasi. Saat magma mendingin mendekati permukaan, pelepasan gas dan air menghasilkan fluida panas yang meresap ke batuan dinding, memulai fase hidrotermal dengan endapan sulfida dan oksida logam. Perubahan ini sering melibatkan asimilasi dan pencampuran magma, menghasilkan pola geokimia kompleks pada plagioklas. Transisi tersebut menandai akhir siklus magmatik, di mana energi panas bumi dimanfaatkan untuk alterasi batuan dan mineralisasi.

Pemisahan Logam Secara Tidak Kompatibel dan *Immiscibel*

Perilaku unsur logam dalam magma sangat dipengaruhi oleh proses kristalisasi fraksional, di mana magma yang awalnya

homogen mengalami pemisahan fase cair dan padat secara bertahap. Unsur logam seperti besi, nikel, dan kromium berperilaku berbeda tergantung pada afinitasnya dengan mineral silikat yang mengkristal lebih dulu. Proses ini menghasilkan evolusi kimia magma, di mana konsentrasi unsur tertentu meningkat atau menurun seiring berkurangnya volume lelehan magma. Studi geokimia menunjukkan bahwa magma mafik, misalnya basalt, sering kali menjadi sumber utama deposit logam karena kandungan oksida besinya yang tinggi. Selama pendinginan, magma kehilangan panas dan tekanan, memicu pembentukan kristal awal yang “menangkap” unsur logam tertentu. Akhirnya, perilaku ini menjelaskan pembentukan batuan beku yang bervariasi komposisinya, dari ultramafik hingga felsik.

Unsur kompatibel dan tidak kompatibel membagi unsur logam berdasarkan kecocokannya dengan struktur kristal mineral selama kristalisasi. Unsur kompatibel, seperti nikel dan kromium, mudah masuk ke dalam kisi kristal mineral mafik seperti olivin dan piroksen karena ukuran ion dan muatannya yang serupa dengan magnesium atau besi. Sebaliknya, unsur inkompatibel seperti tembaga, seng, dan timbal sulit terakomodasi dalam mineral silikat awal, sehingga tetap terlarut dalam lelehan residu. Perbedaan ini krusial dalam pemodelan evolusi magma, karena unsur kompatibel cepat terkuras dari cairan, sementara inkompatibel mengalami pengayaan signifikan. Dalam magma toleitik, misalnya, rasio unsur ini mencerminkan tingkat diferensiasi magma dari sumber mantel. Konsep ini juga diterapkan dalam eksplorasi mineral, di mana pola distribusi unsur inkompatibel menandakan potensi endapan sulfida.

Konsentrasi unsur logam meningkat secara dramatis selama kristalisasi silikat karena efek *Rayleigh Fractionation*, di mana kristal yang terpisah membawa unsur kompatibel keluar dari lelehan. Saat fraksi kristalisasi mencapai 50-70%, sisa lelehan magma menjadi kaya akan unsur inkompatibel seperti litium, rubidium, dan yttrium, yang koefisien partisi (D) kurang dari 1. Sebaliknya, unsur kompatibel seperti kobalt dan vanadium menurun tajam

karena $D > 1$, terutama dalam mineral seperti spinel dan olivin. Proses ini terlihat jelas pada deret reaksi Bowen, di mana kristalisasi olivin awal mengubah rasio Mg/Fe dalam magma. Pengkayaan ini juga dipengaruhi oleh tekanan dan suhu, dengan magma dalam kerak menghasilkan konsentrasi lebih tinggi dibanding intrusi dangkal. Akibatnya, magma akhir sering membentuk pegmatit atau urat hidrotermal yang kaya logam.

Peran mineral silikat dalam “menyingkirkan” unsur logam dari lelehan terutama melalui inkorporasi ke dalam struktur kristalnya selama tahap awal kristalisasi. Mineral seperti olivin dan klinopiroksen bertindak sebagai “penyapu” unsur kompatibel, memindahkannya dari fase cair melalui substitusi ionik, sehingga lelehan residu menjadi miskin magnesium dan kaya alkali. Plagioklas, misalnya, mengikat kalsium dan natrium, mempercepat pemisahan logam transisi seperti mangan. Proses ini diperkuat oleh segregasi gravitasi, di mana kristal berat tenggelam dan membentuk kumulasi mafik di dasar ruang magma. Mineral silikat akhirnya memicu *immiscibility* cairan sulfida, yang memerangkap logam berharga seperti platinum dan emas dari lelehan silikat. Dengan demikian, mineral silikat tidak hanya mengontrol komposisi magma tetapi juga menjadi kunci dalam pembentukan deposit bijih.

Perbedaannya cukup mendasar, walaupun terkesan mirip, namun aspek geokimianya berbeda sama sekali. Mineral atau unsur yang tidak kompatibel (*incompatible*) hal ini terkait dengan geokimia unsur, bukan perilaku cairan. Unsur tidak kompatibel adalah unsur yang

Rangkuman perbedaan sifat antara *incompatible* dan *immiscible*

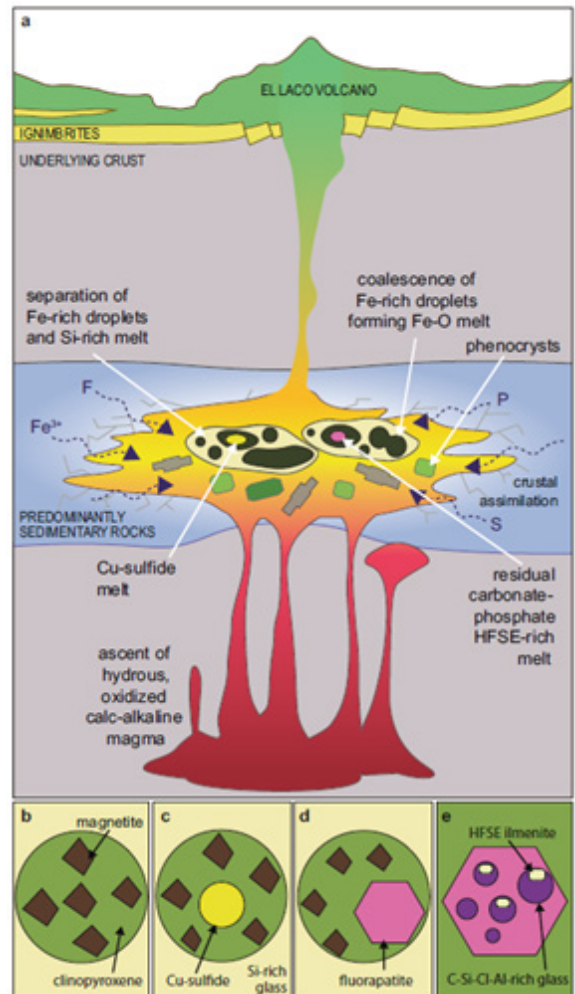
Aspek	Tidak Kompatibel	Immiscible
Level proses	Kristalisasi mineral	Pemisahan fase cair
Fokus	Unsur dengan kristal	Cairan dengan cairan
Terjadi saat	Pendinginan magma	Magma masih cair
Akibat utama	Unsur terkayakan di akhir lelehan magma	Logam terkonsentrasi ekstrem
Contoh	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, K, REE, U, Th	Lelehan sulfida dan silikat

tidak “betah” atau tidak cocok masuk ke dalam struktur kristal mineral mayor (seperti silikat) saat magma mengkristal. Akibatnya, unsur ini tertinggal di lelehan/cairan sisa magma, yakni terkonsentrasi pada magma sisa (*residual melt*).

Penyebab tidak kompatibel yaitu: ukuran ion terlalu besar/kecil, muatan ion tidak cocok, tidak sesuai dengan situs kristal (misalnya olivin, piroksen, plagioklas). Contoh unsur tidak kompatibel yakni: Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, Sn, W, K, Rb, Cs, REE ringan (La, Ce, Nd), U, Th, Nb, Ta, H₂O, CO₂, F, dan Cl. Implikasi geologinya unsur-unsur tersebut membentuk: pegmatit, granit evolusi lanjut, dan sistem hidrotermal. Sehingga berperan besar dalam mineralisasi atau pengendapan logam seperti endapan emas epitermal, porfiri, dan REE. Sedangkan unsur-unsur bersifat kompatibel terdiri dari Ni, Cr, Co, Fe, V, dan Mn.

Sifat mineral atau fase *immiscible* (tak saling bercampur), hal ini merupakan istilah fase fisika-kimia, bukan struktur kristal atau padatan. *Immiscible* berarti dua fase cair tidak bisa saling bercampur homogen, meskipun berada dalam magma yang sama. Dua fase cair tersebut terpisah seperti minyak dan air. Kondisi tersebut umumnya terjadi antara lelehan sulfida dengan lelehan silikat, lelehan karbonatit dengan silikat, kadang lelehan Fe-oksida dengan silikat. Penyebab kondisi ini, yakni perbedaan besar dalam polaritas kimia, ikatan (S-metal vs Si-O), tegangan antarmuka, dan kandungan sulfur / oksigen. Contoh: Ni-Cu-PGE sulfida terpisah dari magma basaltik, serta sulfida dengan mafik dan ultramafik. Contoh logam kalkofil (Ni, Cu, Co, Au, PGE) “lompat” ke lelehan sulfida, terkonsentrasi sangat tinggi, bukan dalam kondisi kristalisasi, tapi pemisahan masing-masing sebagai cairan. Jadi *immiscible* terkait dengan “bisa bercampur atau tidak antar cairan”. Terjadi saat pendinginan magma dengan kondisi magma masih cair, akibatnya utamanya unsur terkayakan di lelehan akhir, logam terkonsentrasi ekstrem.

Kasus, lelehan sulfida vs silikat, ada ungkapan “Sulfida itu tidak kompatibel” tidak benar, yang benar adalah sulfida *immiscible*, bukan *incompatible*. REE bukan *immiscible*



Contoh pemisahan logam akibat sifat *immiscible*. Genesa endapan El Laco. (a) Model pemisahan kompleks beberapa lelehan yang tidak bisa tercampur (*immiscible*) di dapur magma andesitik El Laco. (b) dan (d) Gambar fase mineral dalam bentuk gumpalan (globula) yang tertanam dalam gelas dasitik kaya Si yang terdapat sebagai inklusi dalam lelehan tidak bercampur (*immiscible*). e Gambar inklusi lelehan nano tidak bercampur (*immiscible*) dalam fluorapatit dari (d).

namun REE *incompatible*, tapi tetap larut dalam silikat. Sebagai kata kuncinya yaitu: *incompatible* artinya tidak masuk ke dalam kristal, sedangkan *immiscible* adalah tidak bercampurnya cairan.

Penulis: Mahasiswa Teknologi Geologi,
Angkatan 2024

Getme

Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung
Jl. Jend. Sudirman No. 623 Bandung 40211,
Telp: 0822-1999-5001
Email: getme.pepb@gmail.com
Website: <https://pepbandung.ac.id>

