



Kajian Studi Hidrogeologi dan Hidrogeokimia di Area *Waste Dump* PT. XYZ

Hanifa Octaviani^{1*}, Irwan Iskandar^{1,2}, Andy Yahya Al Hakim², Janice Clementine da Costa¹

¹ Program Studi Magister Teknik Airtanah, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 10, Bandung 40132, Indonesia

² Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 10, Bandung 40132, Indonesia

Abstrak

PT. XYZ merupakan perusahaan tambang emas yang membangun sistem *underdrain* untuk mengalirkan air permukaan melewati area *waste dump*. Seiring peningkatan elevasi timbunan, muncul rembesan dengan debit tinggi saat hujan (hingga ± 8 L/s) dan tetap muncul pada musim kering (± 1 L/s). Kondisi ini mengindikasikan muka airtanah telah mencapai permukaan, sehingga air keluar sebagai *seepage* yang berpotensi mengganggu kestabilan lereng serta menjadi jalur transport kontaminan. Uji *tracer rhodamine* tidak menunjukkan hasil pada area hilir, diduga akibat dilusi dan penjebakan pada kantong air bawah permukaan, sehingga diperlukan studi hidrogeologi dan hidrogeokimia untuk mengetahui sumber dan mekanisme rembesan. Penelitian ini mengintegrasikan pengukuran fisika-kimia *in situ* dan analisis laboratorium terhadap sampel airtanah, air permukaan, dan air hujan. Analisis ion utama dan logam terlarut dilakukan menggunakan IC dan ICP-MS, sedangkan isotop stabil $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^{13}\text{C}$ dianalisis dengan Picarro Analyzer serta IRMS. Hasil plot pada diagram Piper menunjukkan dua fasies air, yaitu Ca-SO_4 dan Ca-HCO_3 . Data isotop mendukung bahwa rembesan berasal dari interaksi airtanah dangkal dan air permukaan yang meresap melalui zona permeabel. Model konseptual aliran bawah permukaan berhasil menggambarkan jalur rembesan potensial, dan penelitian ini merekomendasikan peningkatan sistem drainase, kontrol infiltrasi, serta optimalisasi *underdrain* sebagai mitigasi.

Kata Kunci: Hidrogeologi; hidrogeokimia; aliran airtanah; rembesan; *waste dump*.

Abstract

PT. XYZ is a gold mining company that built an *underdrain* system to drain surface water through the *waste dump* area. As the elevation of the dump increased, high-flow seepage occurred during rainfall (up to ± 8 L/s) and continued to occur during the dry season (± 1 L/s). This condition indicates that the water table has reached the surface, causing water to seep out, which could potentially disrupt slope stability and become a transport pathway for contaminants. Rhodamine tracer tests did not show results in the downstream area, presumably due to dilution and trapping in underground water pockets, requiring hydrogeological and hydrogeochemical studies to determine the source and mechanism of seepage. This study integrates *in situ* physicochemical measurements and laboratory analysis of groundwater, surface water, and rainwater samples. Major ion and dissolved metal analyses were performed using IC and ICP-MS, while stable isotopes $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ were analyzed with a Picarro Analyzer and IRMS. The results plotted on the Piper diagram show two water facies, namely Ca-SO_4 and Ca-HCO_3 . Isotope data support that the seepage originates from the interaction of shallow groundwater and surface water that seeps through the permeable zone. The conceptual model of subsurface flow successfully describes the potential seepage path, and this study recommends improving the drainage system, controlling infiltration, and optimizing *underdrain* as mitigation measures..

Keywords: Hydrogeology; hydrogeochemistry; groundwater flow; seepage; *waste dump*.

* Korespondensi : hanifaoctaviani@gmail.com

Diajukan : 28 Agustus 2025

Diterima : 21 November 2025

Diterbitkan : 16 Maret 2026

PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor pertambangan, khususnya pertambangan emas, di Indonesia telah meningkatkan tekanan terhadap sumber daya air dan lingkungan. Salah satu isu krusial yang sering muncul adalah perubahan rezim hidrologi lokal dan potensi kontaminasi air akibat operasi penambangan, termasuk pengelolaan limbah dan fasilitas penunjang (Rofikoh & Iskandar, 2025; Pascayulinda et al., 2024).

PT. XYZ merupakan perusahaan yang bergerak dalam kegiatan penambangan dan pengolahan bijih emas dan mineral ikutannya yang terletak di Sulawesi Utara. Dalam mendukung aktivitas penambangan, PT. XYZ membangun beberapa *underdrain* untuk mengalirkan air dari *creek* di arah Selatan ke Utara, melewati area disposal. Seiring dengan aktivitas penambangan dan peninggian level timbunan di disposal, dalam beberapa waktu terakhir dijumpai adanya area aliran rembesan air. Fenomena ini tidak hanya berpotensi mempengaruhi stabilitas geoteknik lereng, tetapi juga dapat memengaruhi kualitas airtanah dan air permukaan di sekitarnya. Karakteristik morfologi perbukitan dengan kondisi geologi yang kompleks serta curah hujan tinggi di daerah tropis semakin menambah kompleksitas dinamika air di lokasi ini (Kirsch, 2014).

Penjejakan dengan menggunakan *rhodamine* telah dilakukan untuk mengetahui sumber rembesan air. Setelah dilakukan pelarutan di bagian *upstream*, material ini tidak dijumpai di *down stream*, dimungkinkan material mengalami dilusi atau mengendap dalam *pocket-pocket* air sebelum mencapai *downstream*.

Penelitian ini bertujuan untuk memahami sumber dan mekanisme rembesan air serta interaksi airtanah dan air permukaan dengan mineral selama air mengalir. Karakteristik mineralogi dan geokimia pada tanah mengontrol terjadinya interaksi air–batuan serta proses dispersi unsur terlarut. Melalui analisis komprehensif terhadap parameter fisika-kimia airtanah dan air permukaan, serta pengujian laboratorium lanjutan meliputi analisis hidrogeokimia ion mayor, logam tanah jarang (REE), dan isotop stabil ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$), penelitian ini berupaya menelusuri jalur aliran air dan memahami proses interaksi antara air, batuan, dan material timbunan (Rofikoh & Iskandar, 2025; Pascayulinda et al., 2024).

Pendekatan hidrogeokimia yang didasarkan

pada analisis komposisi kimia air, isotop stabil, dan unsur jejak sebagai tracer alami dapat digunakan untuk mengidentifikasi sumber air, menelusuri jalur pergerakan fluida, serta mengevaluasi keterhubungan antara air permukaan dan airtanah (Hakim et al., 2023). Hasil analisis data lapangan dan laboratorium kemudian diintegrasikan untuk mengembangkan model konseptual aliran air yang dapat menjelaskan fenomena rembesan yang terjadi.

Studi ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman hidrogeologi di lingkungan pertambangan tropis, khususnya dalam pengelolaan airtanah dan mitigasi risiko lingkungan. Temuan dari penelitian ini akan menjadi dasar ilmiah untuk rekomendasi pengelolaan air yang lebih efektif, serta peningkatan stabilitas lereng di area pembuangan material tambang, mendukung praktik pertambangan yang bertanggung jawab dan berkelanjutan (Rahardjo et al., 2022).

LOKASI PENELITIAN

Kesampaian Daerah

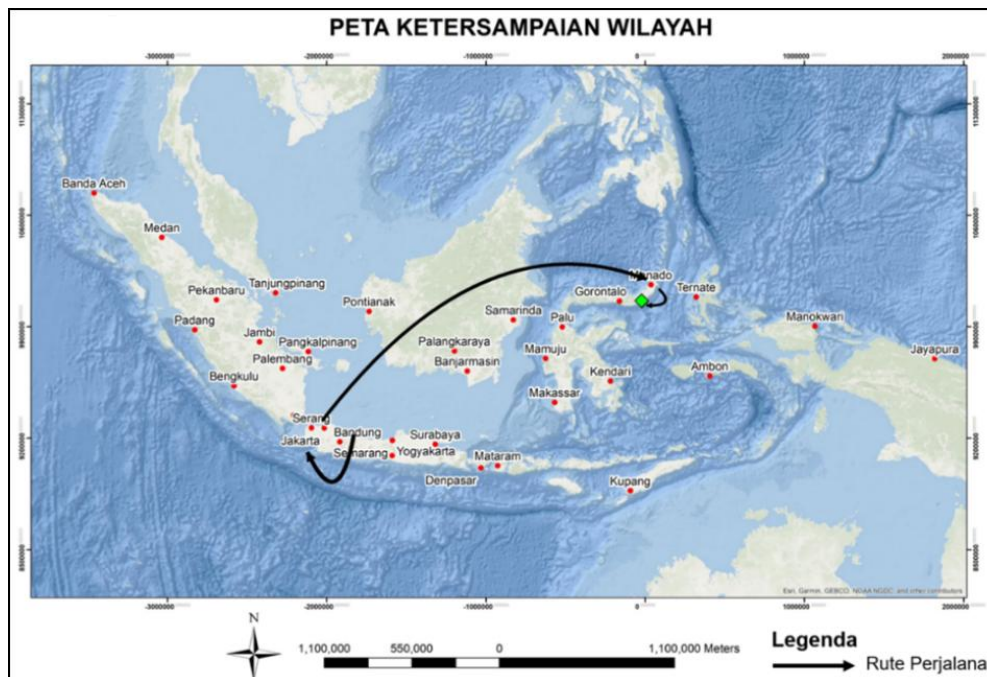
Lokasi penelitian terletak di area South Magazine, yang berada dalam wilayah operasional PT. XYZ di Provinsi Sulawesi. Secara administratif, lokasi ini dikenal sebagai salah satu pusat aktivitas pertambangan emas terbuka di Sulawesi. Area studi memiliki aksesibilitas yang relatif baik, yaitu dapat dicapai melalui penerbangan dari Jakarta menuju Bandara Sam Ratulangi di Manado, dilanjutkan dengan perjalanan darat menggunakan kendaraan roda empat selama kurang lebih empat jam menuju lokasi penelitian. Infrastruktur jalan yang memadai memungkinkan mobilitas peralatan dan personel lapangan secara efisien.

Kondisi Geologi

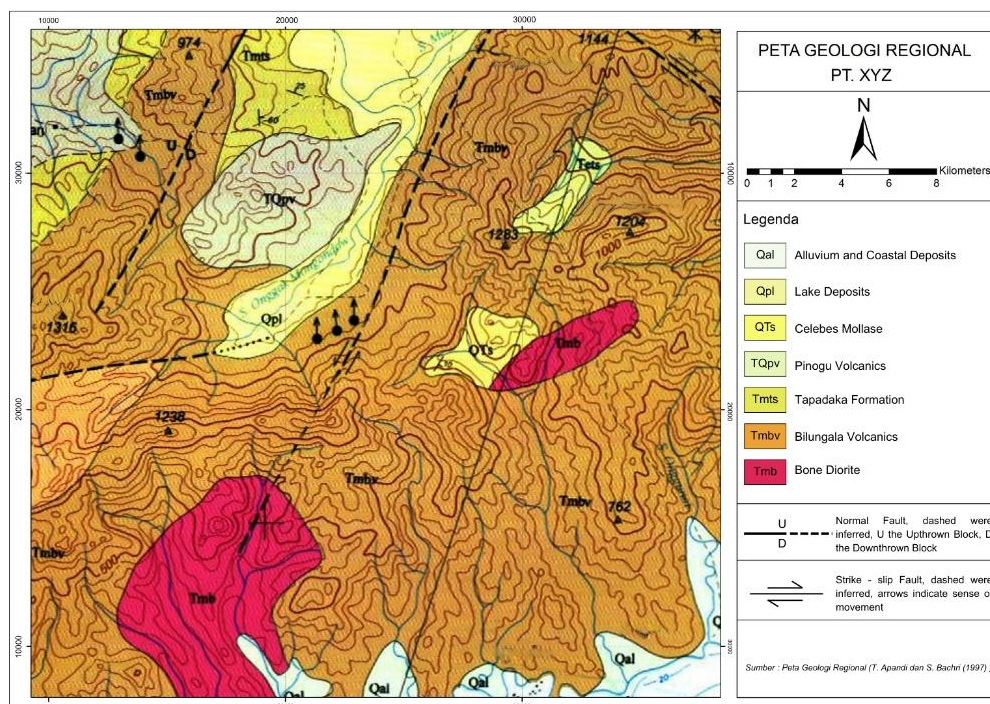
Area penelitian terletak pada wilayah dengan kondisi geologi yang didominasi oleh batuan vulkanik dan intrusif berumur Kenozoikum, yang merupakan bagian dari busur magmatik Sulawesi (Perelló, 1994). Litologi utama yang menyusun daerah ini meliputi tuff, andesit, breksi, serta batuan intrusif seperti diorit yang mengalami alterasi hidrotermal intensif (Adam et al., 2024). Proses alterasi yang terjadi antara lain argilik, advanced argilik, dan propilitik, yang merupakan ciri khas sistem endapan emas tipe epithermal sulfidasi rendah hingga menengah (Nugraha & Idrus, 2023).

Secara keseluruhan, kondisi geologi dan struktur di area penelitian mendukung terbentuknya endapan emas epithermal yang ekonomis sekaligus menimbulkan tantangan teknis dalam pengelolaan air dan kestabilan lereng. Mineralisasi emas di wilayah ini umumnya terkait dengan urat kuarsa yang mengandung mineral sulfida seperti pirit,

kalkopirit, dan magnetit, dengan kadar emas yang bervariasi sesuai dengan intensitas alterasi dan struktur geologi setempat (Zhu, dkk, 2011). Kondisi geologi tersebut menciptakan lingkungan yang ideal untuk terbentuknya endapan emas epithermal dengan karakteristik hidrogeokimia yang khas.



Gambar 1. Peta Ketersampaian Wilayah



Gambar 2. Peta Geologi Regional

METODOLOGI

Jenis Data dan Sumber Data

Data primer

Data yang diperoleh langsung dari kegiatan lapangan meliputi pengukuran parameter fisika dan kimia air (pH, suhu, konduktivitas listrik, TDS), pengambilan sampel airtanah, air permukaan, rembesan, dan air hujan di area penelitian. Selain itu, dilakukan pemetaan morfologi dan kondisi geologi permukaan.

Data sekunder

Data pendukung berupa peta topografi, peta geologi regional, data curah hujan historis, serta data eksplorasi sebelumnya yang relevan dengan lokasi studi.

Teknik Pengumpulan Data

Orientasi lapangan

Menentukan titik-titik strategis untuk pengambilan sampel air dan pengukuran parameter fisika air berdasarkan kondisi morfologi dan geologi.

Pengumpulan data lapangan

- Pengukuran Parameter Fisika Air, dilakukan secara in situ menggunakan alat portable untuk mengukur pH, suhu, konduktivitas listrik (EC), dan *total dissolved solids* (TDS) pada setiap titik pengambilan sampel.
- Pengambilan Sampel Air, sampel airtanah, air permukaan, rembesan, dan air hujan diambil menggunakan botol steril sesuai prosedur standar untuk kemudian dianalisis di laboratorium.
- Pengukuran Debit Rembesan dan Rembesan, dilakukan dengan metode pengukuran aliran menggunakan wadah volume tertentu dan stopwatch untuk menghitung debit air yang keluar dari rembesan.
- Pemetaan dan Dokumentasi, dilakukan pencatatan koordinat GPS, foto lokasi, dan observasi kondisi geologi dan hidrologi di lapangan.

Pengolahan Data

- Analisis Laboratorium: Sampel air dianalisis untuk kandungan ion mayor menggunakan *Ion Chromatography* (IC), logam tanah jarang (REE) dan unsur logam lainnya dengan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), serta isotop stabil ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) untuk menelusuri sumber

dan jalur aliran air.

- Pengolahan Data Fisika-Kimia dan Isotop: Data dianalisis secara statistik dan hidrogeokimia untuk mengidentifikasi karakteristik sumber air, proses pencampuran, dan interaksi airtanah-air permukaan.
- Pemetaan dan Model Konseptual: Data lapangan dan hasil analisis laboratorium diintegrasikan menggunakan perangkat lunak GIS untuk memetakan distribusi rembesan dan rembesan, serta membangun model konseptual aliran air di area penelitian.
- Evaluasi dan Interpretasi: Dilakukan interpretasi hasil untuk memahami mekanisme rembesan dan dampaknya terhadap kestabilan lereng serta kualitas air, sebagai dasar rekomendasi pengelolaan air tambang.

HASIL

Analisis Ion Utama

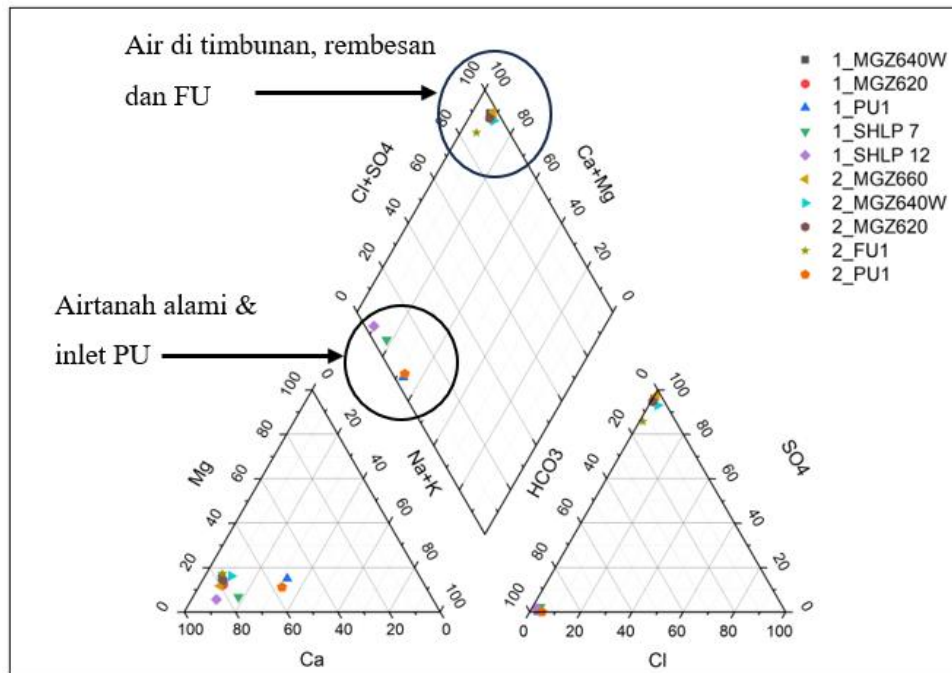
Fasies air yang ditemukan pada area studi terdiri dari dua tipe fasies air yaitu air Ca-SO_4 yang merupakan tipikal air drainase tambang terdiri dari air rembesan pada area Magazine serta air Final Underdrain. Hal ini mengindikasikan air pada rembesan di area Magazine telah bereaksi dengan material disposal. Fasies kedua yaitu air Ca-HCO_3 yang merupakan tipikal airtanah dangkal. Fasies ini terdiri dari airtanah pada sumur pantau (SHLP 7 dan SHLP 12) dan juga air yang menjadi *inlet underdrain* (titik pengamatan PU).

Analisis Logam Tanah Jarang

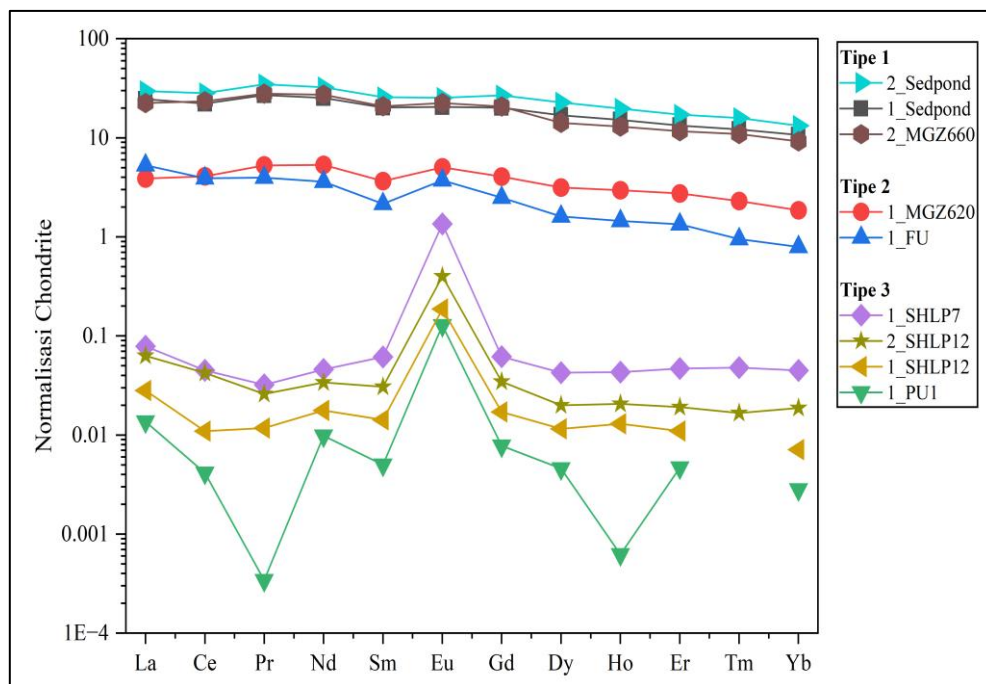
Kandungan logam jejak didapatkan dari hasil analisis ICP-MS kemudian dilakukan normalisasi dengan membagi kelimpahan REE pada sampel air dengan nilai referensi kondrit dan kemudian diplot untuk mendapatkan pola pengkayaan dari logam tertentu.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4 tersebut dilakukan klasifikasi tipe air berdasarkan logam tanah jarang, terdapat tiga tipe air di lokasi penelitian:

- Tipe 1 yang dicirikan oleh pola diagram REE mendatar dan tanpa anomali Eu. Tipe 1 ditunjukkan oleh air pada lokasi sediment pond dan MGZ660.
- Tipe 2 yang dicirikan oleh karakteristik yang serupa dengan Tipe 1, namun memiliki pengayaan relatif yang lebih rendah dari Tipe 1. Tipe 2 ditunjukkan oleh air pada lokasi



Gambar 3. Diagram Piper



Gambar 4. Grafik Elemen Tanah Jarang Yang Telah Dinormalisasi Kondrit

MGZ620 dan Final Underdrain.

- c. Tipe 3 yang dicirikan oleh pola diagram REE mendatar dengan kehadiran anomali Eu yang kuat. Tipe 3 ditunjukkan oleh airtanah dangkal di sumur pantau dan air inlet underdrain.

Tipe 2 diinterpretasikan sebagai hasil pencampuran air Tipe 1 dan Tipe 3. Dengan

menggunakan air Tipe 1 dan Tipe 3 sebagai end-member, simulasi perhitungan pencampuran air dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh karakteristik air Tipe 2 seperti pada Tabel 1 dan Gambar 5. Berdasarkan simulasi tersebut, diperoleh rasio 15% Tipe 1 dan 85% Tipe 2 untuk memperoleh air dengan komposisi REE Tipe 2. Hal ini merepresentasikan kondisi di MGZ620

yang menunjukkan hasil pencampuran 85% air dari underdrain dan 15% air dari sediment pond.

Analisis Isotop ^2H dan ^{18}O

Isotop stabil molekul air yang dianalisis pada lokasi pengamatan adalah $\delta^2\text{H}$ (Deuterium) dan $\delta^{18}\text{O}$. Pada Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa air yang diambil pada periode pengambilan kedua cenderung lebih ringan dibandingkan dari periode pengambilan pertama. Hal ini disebabkan oleh terjadinya hujan diantara periode pengambilan sampel air. Pada periode pertama, terdapat dua kelompok air ketika tidak terjadi hujan, yaitu air pada area inlet dan sumur pantau dengan isotop yang ringan serta kelompok air berat yang terdiri dari air Sedimen Pond dan rembesan MGZ660 hingga MGZ620.

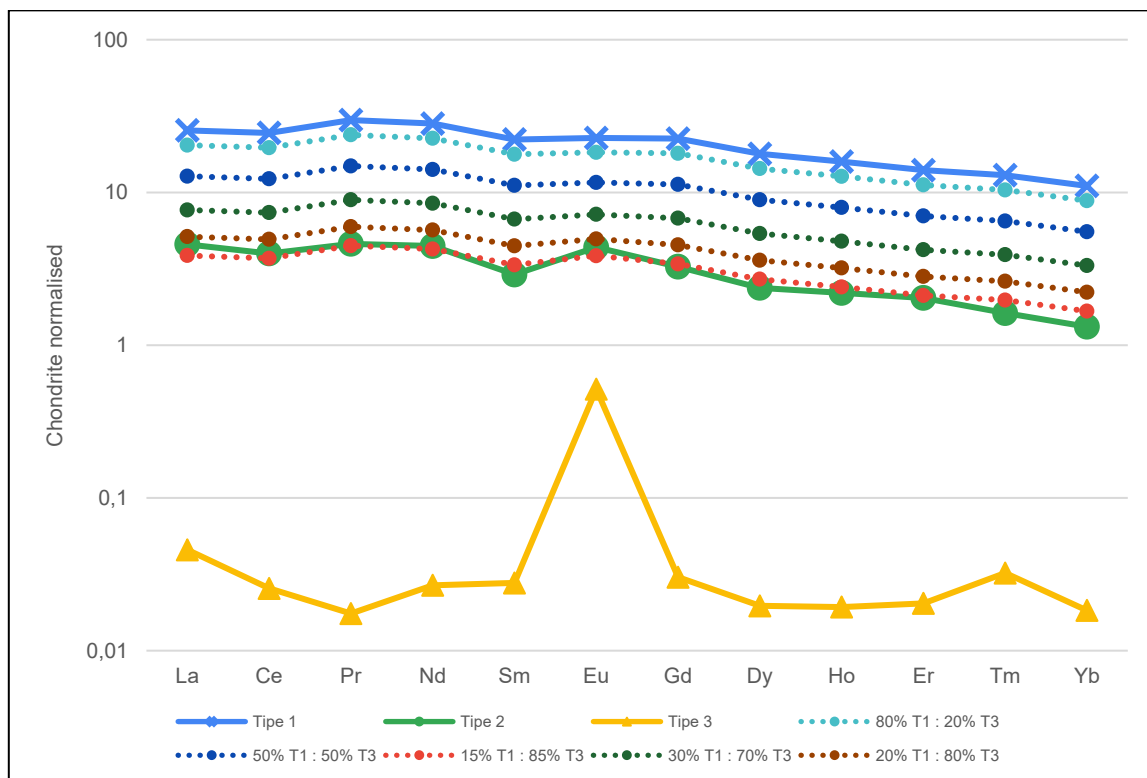
Pada periode kedua terdapat tiga kelompok air yang terdiri dari air dengan isotop berat seperti MGZ660 dan Sedimen Pond, lalu kelompok kedua merupakan air dengan isotop sedang, terdiri dari Cell Q dan MGZ620, dan kelompok ketiga berupa air dengan isotop ringan terdiri dari air pada area inlet baik itu air *Primary Underdrain* dan air sumur pantau beserta dengan final underdrain dan MGZ640E. Hal ini

mengindikasikan air dari area inlet mengalir ke lereng Magazine baik melalui sistem underdrain maupun pada sistem akuifer bebas pada badan disposal.

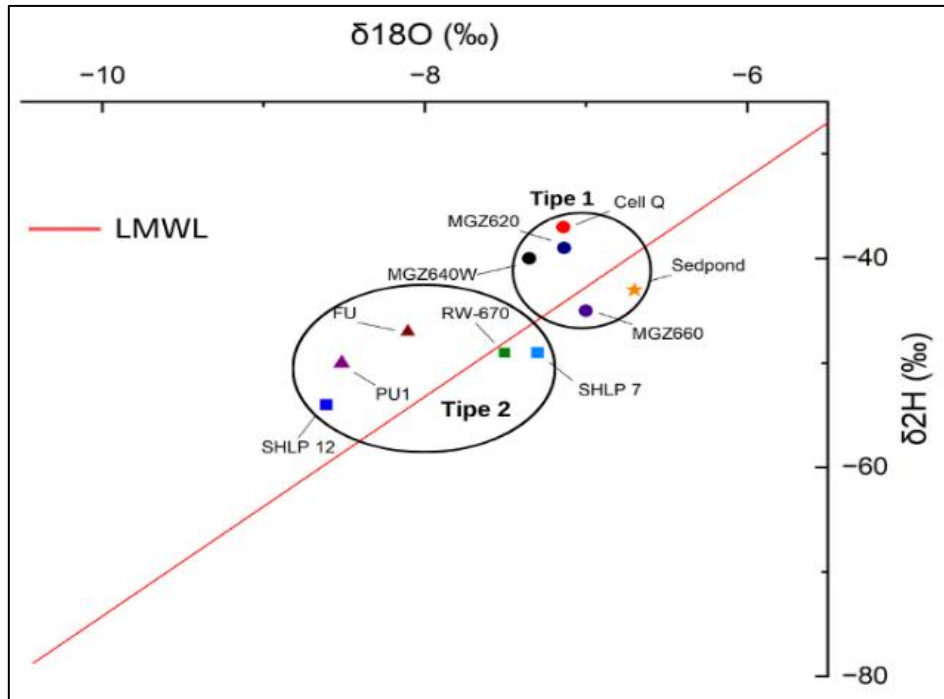
Tabel 1. Konsentrasi Elemen Tanah Jarang Yang Terukur dan Contoh Konsentrasi Hasil Estimasi Tipe 2 Yang Dihitung Berdasarkan Tipe 1 dan Tipe 3

	Tipe 2 (ppb)	Tipe 1 (ppb)	Tipe 3 (ppb)	Simulasi Campuran 1* (T1+T3) (ppb)
La	4.58	25.49	0.05	3.86
Ce	3.99	24.53	0.03	3.70
Pr	4.61	29.77	0.02	4.48
Nd	4.46	28.25	0.03	4.26
Sm	2.90	22.21	0.03	3.36
Eu	4.37	22.73	0.52	3.85
Gd	3.26	22.53	0.03	3.40
Dy	2.37	17.90	0.02	2.70
Ho	2.20	15.93	0.02	2.41
Er	2.04	14.00	0.02	2.12
Tm	1.62	12.97	0.03	1.97
Yb	1.32	11.04	0.02	1.67

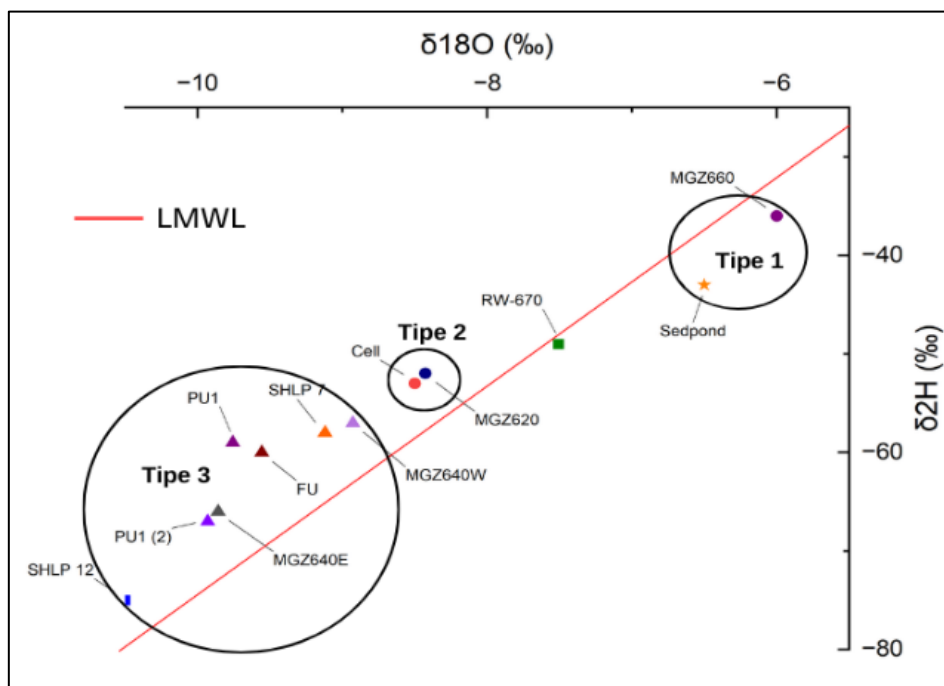
* Campuran 15% air Tipe 1 dan 85% Tipe 3



Gambar 5. Grafik Diagram Elemen Tanah Jarang yang Telah Dinormalisasi Kondrit untuk ketiga tipe air serta hasil Simulasi Pencampuran Airtanah dari Tipe 1 dan Tipe 3. Tipe 1 = Sediment Pond dan MGZ660, Tipe 2 = MGZ620 dan Final Underdrain, Tipe 3 = SHLP, SHLP 12, dan *Primary Underdrain*.



Gambar 6. Hasil plot Isotop $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ Dari 9 Titik Sampel Air Permukaan dan rembesan pada pengambilan pertama.



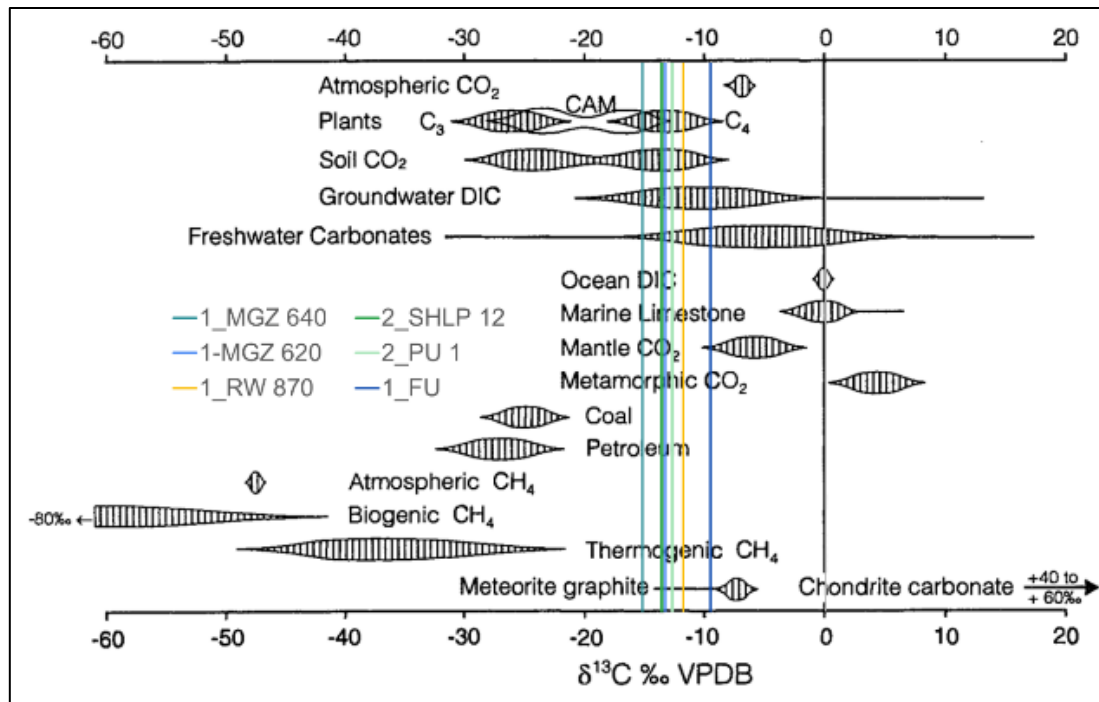
Gambar 7. Hasil plot Isotop $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dari 9 Titik Sampel Air Permukaan dan Rembesan pada pengambilan kedua.

Air pada MGZ660, MGZ640W, dan MGZ620 memiliki komposisi isotop yang berada di antara komposisi isotop air PU1 dan Sedpond. Hal ini mengindikasikan air yang keluar pada dinding lereng timbunan South Magazine merupakan

hasil pencampuran air dari inlet underdrain dan sediment pond. Interpretasi ini didukung oleh simulasi perhitungan stabil isotop dengan menggunakan air PU1 dan air sedpond sebagai end member seperti pada Tabel 2. Dari perhitung-

Tabel 2. Persentase Pencampuran pada FU dan MGZ640

Lokasi	Periode 1		Periode 2		Average	
	Inlet PU	Sediment Pond	Inlet PU	Sediment Pond	Inlet PU	Sediment Pond
FU	81%	19%	94%	6%	88%	12%
MGZ640	46%	54%	76%	24%	61%	39%



Gambar 8. Data Isotop $\delta^{13}\text{C}$ Pada Sampel Penelitian (Clark and Fritz, 1997).

Tabel 3. Hasil Uji Lboratorium Isotop $\delta^{13}\text{C}$

No	Sample Name	Date	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
1	1_MGZ 640E	24/11/2024	-15.021
2	1_MGZ 620	19/11/2024	-13.154
3	1_FU	20/11/2024	-9.456
4	2_MGZ 660	24/11/2024	-12.877
5	2_PU 1	26/11/2024	-12.594
6	RW 870	21/11/2024	-11.693
7	2_SHLP 12	24/11/2024	-13.472

an rasio pencampuran didapatkan PU memiliki persentasi yang lebih besar untuk aliran underdrain, namun untuk aliran air dilemang Magazine dipengaruhi oleh *Sedimen Pond*.

Analisis Isotop ^{13}C

Sampel air dari rembesan dan air permukaan kemudian dilakukan analisis isotop ^{13}C dengan hasil seperti pada Tabel 3. Perbandingan nilai isotop ^{13}C terhadap data referensi seperti pada Gambar 8 menunjukkan tidak adanya karbon yang berasal dari CN pada area timbunan maupun pada sistem *underdrain*, nilai isotop karbon stabil $\delta^{13}\text{C}$ pada sianida berada dalam kisaran -32 hingga -23‰ (Weihmann et al., 2007). Pada titik pengamatan *Final Underdrain* didapatkan nilai isotop yang lebih berat dibandingkan dengan yang lainnya. Hal ini diduga karena adanya pencampuran dengan material NAF yang mengandung karbonat yang digunakan dalam konstruksi *underdrain*. Nilai isotop ^{13}C dari air hujan telah mengalami pergeseran sehingga menjadi lebih ringan dari isotop C atmosfer referensi diduga disebabkan adanya pencampuran dengan pembakaran *fossil fuel*.

PEMBAHASAN

Interpretasi Kondisi Hidrogeokimia

Kandungan *Total Dissolved Solid* (TDS) yang diukur pada sumur pantau (SHLP 7, SHLP 8, dan SHLP 12), menunjukkan variasi nilai yang berada dalam rentang 240 hingga 455 ppm. Namun, terdapat pengecualian pada pengukuran TDS di titik SHLP 7 yang dilakukan pada tanggal 25 November 2024, di mana nilai TDS yang diukur mencapai 2280 ppm. Tingginya nilai TDS pada titik tersebut disebabkan oleh kondisi air yang telah mengering sehingga menyisakan material terlarut yang lebih tinggi akibat banyaknya sedimen yang bercampur dengan air. Sebaliknya, pengukuran nilai TDS pada *primary underdrain* menunjukkan hasil yang cenderung lebih rendah, yaitu kurang dari 200 ppm. Rendahnya nilai TDS pada *primary underdrain* disebabkan karena lokasi ini merupakan *creek* dari air alami.

Nilai *Oxidation Reduction Potential* (ORP) hasil pengukuran sumur pantau (SHLP 7, SHLP 8, dan SHLP 12) dengan variasi rentang nilai 70 hingga 178 mv dan pengukuran nilai ORP pada *primary underdrain* yang cenderung cukup tinggi, yaitu dengan rentang 85 hingga 276 mv mencerminkan kondisi oksidasi-reduksi di masing-masing lokasi. Nilai ORP yang rendah menunjukkan kondisi reduktif dan nilai ORP yang tinggi menunjukkan kondisi oksidatif. Rendahnya nilai salinitas yang terukur pada ketiga sumur pantau (SHLP 7, SHLP 8, dan SHLP 12) dengan rentang nilai 0.01 hingga 0.03 % menunjukkan bahwa air di lokasi tersebut memiliki kandungan garam terlarut yang sangat kecil. Rendahnya salinitas menandakan proses pelarutan mineral yang minim.

Airtanah cenderung tidak mengalami pengayaan REE dan cenderung mempunyai pH netral. Sedangkan air yang telah mengalami kontak dengan disposal pada pH yang rendah mengakibatkan adanya interaksi air-mineral, sehingga mengakibatkan adanya peristiwa oksidasi, sehingga REE yang semula bersifat immobile menjadi *mobile*, larut, memberikan pengayaan pada air pada sediment pond dan rembesan di MGZ.

Berdasarkan hasil analisis terhadap unsur ion utama yang terkandung dalam air dari sumur pantau dan *primary underdrain*, ditemukan ion yang mendominasi di lokasi tersebut adalah ion kalsium (Ca^{2+}) dan bikarbonat (HCO_3^-). Selanjutnya, analisis terhadap fasies air

menunjukkan bahwa air dari sumur pantau maupun *primary underdrain* dapat dikategorikan ke dalam tipe air dengan klasifikasi Ca-HCO_3 . Klasifikasi ini mencirikan tipe airtanah dangkal yang umumnya terbentuk dari proses pelarutan mineral di lapisan geologi dangkal.

Berdasarkan hasil analisis unsur tanah jarang (REE), diketahui bahwa konsentrasi REE di lokasi sumur pantau dan *primary underdrain* menunjukkan adanya proses pelarutan mineral yang kaya akan kandungan natrium (sodium). Proses pelarutan ini memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan atau pengayaan salah satu unsur tanah jarang, yaitu europium (Eu), di kedua lokasi tersebut. Nilai anomali europium yang terdapat dalam air pada sumur pantau dan *primary underdrain* berkisar antara 12 hingga 22. Berdasarkan klasifikasi logam tanah jarang, yang mempertimbangkan distribusi dan konsentrasi berbagai unsur REE, lokasi sumur pantau dan *primary underdrain* dapat dikelompokkan ke dalam kategori Tipe 3.

Pembahasan mengenai kandungan *Total Dissolved Solid* (TDS) pada lokasi *final underdrain*, *sediment pond*, dan area magazine, terdapat nilai TDS cukup tinggi yaitu lebih dari 800 ppm. Tingginya kandungan TDS ini dapat terjadi karena reaksi dengan batuan selama proses perjalanan aliran airtanah yang berasal dari *primary underdrain* menuju *final underdrain*. Dalam perjalanan tersebut, aliran airtanah melewati area magazine, dengan luas area material disposal yang besar memungkinkan terjadinya interaksi antara airtanah dan material disposal, termasuk batuan dan sedimen di sepanjang jalur aliran. Selama proses tersebut, unsur-unsur kimia dari batuan dan sedimen, seperti mineral-mineral yang larut dalam air, tercampur dengan aliran airtanah, menghasilkan peningkatan konsentrasi material terlarut. Akibat dari proses ini, kandungan TDS dalam airtanah mengalami peningkatan yang signifikan.

Nilai *Oxidation Reduction Potential* (ORP) hasil pengukuran *final underdrain*, *sediment pond*, dan area magazine sangat bervariasi dengan rentang nilai -6 hingga 568 mv. Nilai ORP yang rendah menunjukkan kondisi reduktif dan nilai ORP yang tinggi menunjukkan kondisi oksidatif pada lokasi tersebut. Berdasarkan nilai salinitas pada lokasi *final underdrain*, *sediment pond*, dan area magazine dengan rentang nilai 0.05 hingga 0.12 % menunjukkan bahwa air di lokasi tersebut memiliki kandungan garam

terlarut yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan sumur pantau.

Hasil analisis terhadap komposisi unsur ion utama yang terdapat pada air dari *final underdrain*, *sediment pond*, dan area magazine, ion yang mendominasi di lokasi-lokasi tersebut adalah kalsium (Ca^{2+}) dan sulfat (SO_4^{2-}). Dominasi kedua jenis ion tersebut menunjukkan bahwa air di lokasi tersebut memiliki karakteristik kimia yang sangat dipengaruhi oleh keberadaan mineral-mineral yang kaya akan kalsium dan sulfur, yang dapat berasal dari interaksi kimia antara air dan batuan di area tersebut. Berdasarkan klasifikasi fasies air yang diperoleh dari hasil analisis, air di *final underdrain*, *sediment pond*, dan area magazine dapat dikelompokkan ke dalam tipe air Ca-SO₄ dengan tipikal air drainase tambang.

Berdasarkan analisis unsur tanah jarang (REE), konsentrasi REE pada air yang mengalir dari *sediment pond* mempunyai komposisi yang mirip dengan rembesan di MGZ660, kesamaan ini menindikasikan kesamaan sumber air di kedua lokasi tersebut. Berdasarkan klasifikasi logam tanah jarang, air di *sediment pond* dan MGZ660 termasuk ke dalam kategori Tipe 1. Selanjutnya, air yang mengalir di MGZ620 mempunyai komposisi yang sama dengan *final underdrain*, dimana total REE lebih rendah dibandingkan air Tipe 1, air ini di klasifikasikan pada Tipe 2.

Sintesis Mekanisme Rembesan Air dan Sumbernya

Aliran air yang keluar pada dinding lereng yaitu MGZ660, MGZ640, dan MGZ620 berdasarkan nilai isotopnya merupakan hasil pencampuran dari isotop yang berat dan isotop yang ringan dimana isotop yang berat merupakan air yang keluar di Cell Q kemudian terkumpul di Sedimen Pond yang kembali terinfiltrasi kedalam tanah dan bertemu dengan aliran air dari belakang *leach pad* yang memiliki isotop yang lebih ringan. Sementara itu air yang mengalir di *Final Underdrain* didominasi oleh air dari *Primary Underdrain* yang mengindikasikan sistem *underdrain* tidak mengalami kebocoran.

Penampang Aliran Air

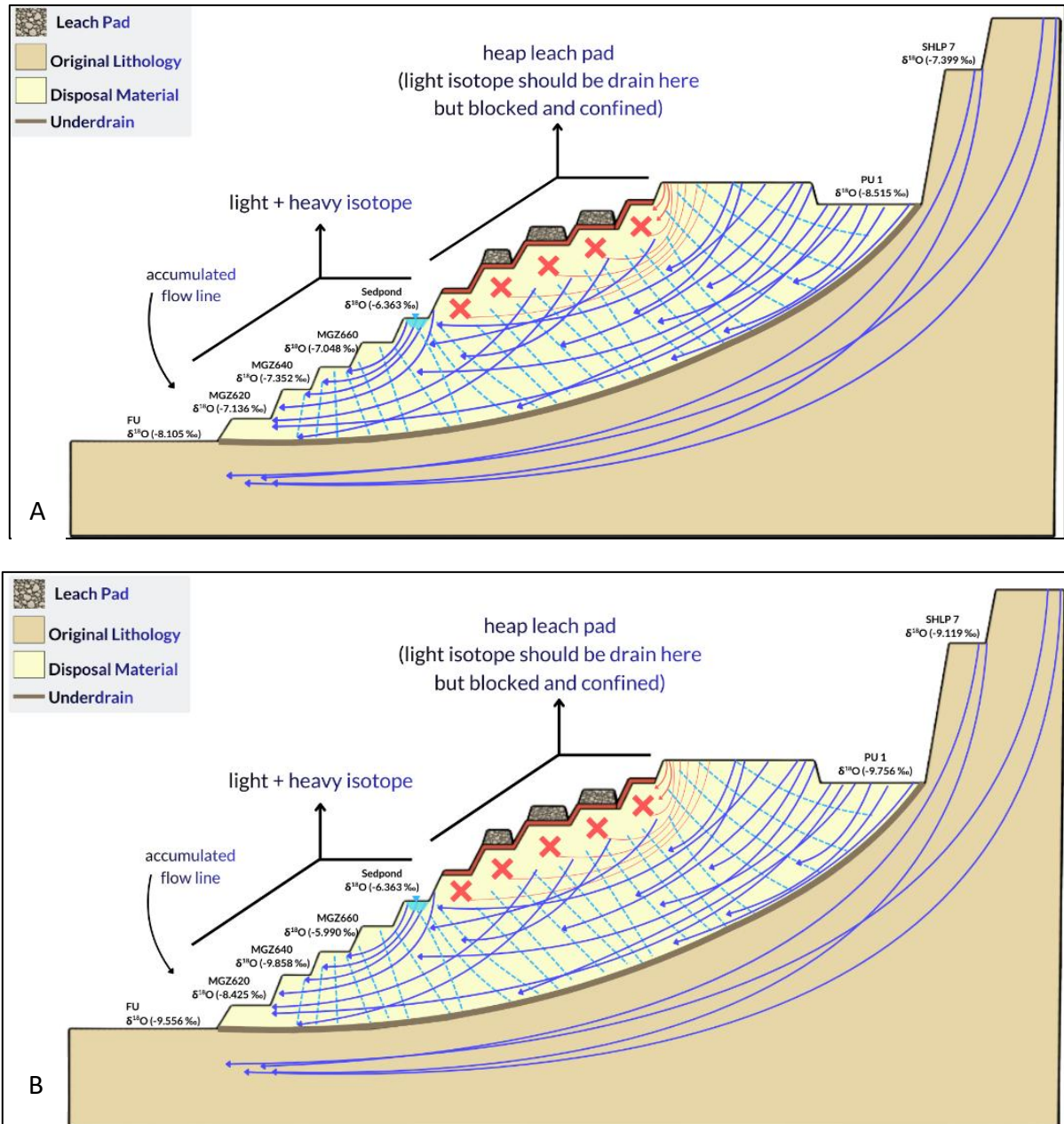
Pada area Magazine terdapat beberapa rembesan yang berada di tekuk lereng pada beberapa elevasi berbeda dengan debit yang stabil dan

tidak terpengaruh oleh hujan, serta terdapat rembesan yang memiliki kenampakan seperti rembesan artesis yaitu pada MGZ620. Aliran rembesan artesis tersebut dapat terjadi disebabkan oleh adanya air pada badan disposal yang tidak dapat keluar serta beban tambahan dari timbunan *leach pad* yang menyebabkan naiknya tekanan hidrostatik.

Leach pad memberikan beban tambahan pada area lereng dengan elevasi lebih rendah dikarenakan konstruksi *leach pad* dilapisi oleh geomembrane yang memberikan efek *confining* sehingga aliran air yang seharusnya akuifer bebas menjadi seperti akuifer tertekan. Aliran air yang seharusnya keluar di lereng menjadi tertahan dan mengalir ke lereng dengan elevasi yang lebih rendah seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Air yang tertahan karena adanya *leach pad* ini sebagian dapat mengalir keluar di Cell Q dan sebagian lagi keluar di tekuk lereng pada MGZ660, MGZ640, MGZ620.

Selain dengan penambahan beban dari adanya *leach pad*, beban aliran juga bertambah karena adanya infiltrasi dari Sedimen Pond yang menampung air dari Cell Q dan *perimeter drainage*. Hal ini didukung dengan hasil perhitungan *two-end* member dari isotop stabil ¹⁸O dimana air yang keluar di South Magazine dipengaruhi oleh air dari *Primary Underdrain* sebesar 46-76% dan Sedimen Pond sebesar 24-54%. Pencampuran juga turut didukung dengan data analisis REE dari sampel air yang mengindikasikan air MGZ620 merupakan pencampuran dari air di PU dan air Sedimen Pond sebesar 85% PU dan 15% Sedimen Pond, sedangkan air di MGZ660 dominan air dari Sedimen Pond. Penambahan beban aliran ini tercerminkan dengan perubahan isotop air pada area magazine yang berubah dalam periode yang pendek, mengindikasikan aliran air pada area magazine sangat dinamis. Sedangkan air pada sumur pantau dan PU memiliki isotop yang relatif stabil menunjukkan aliran yang stagnan.

Tekanan hidrostatik pada lereng perlu diturunkan untuk menghindari terjadinya *failure* pada lereng timbunan South Magazine. Selain itu, mempertimbangkan dominannya proporsi air yang berasal dari inlet underdrain pada air yang keluar pada dinding lereng South Magazine, perlu dilakukan kontrol infiltrasi pada area terbuka yang ada di belakang *leach pad*.



Gambar 9. Konseptual Model Aliran pada area Magazine pada periode A. pertama dan B. kedua.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengolahan dan analisis data lapangan dan uji laboratorium, dapat disimpulkan bahwa:

- Rembesan yang berada di lereng Magazine bersumber dari area recharge di bagian selatan disposal serta air sediment pond yang terinfiltrasi ke dalam timbunan.
- Rembesan ini disebabkan oleh terjebaknya air dalam badan disposal yang seharusnya *terdrain* sehingga alirannya terkonsentrasi pada lereng dengan elevasi rendah.
- Sumber rembesan di Magazine berasal dari

area Inlet *Primary Underdrain* dengan persentase berkisar antara 81% - 94% serta dari Sedimen Pond dengan persentase berkisar antara 6% - 54%.

- Berdasarkan analisis isotop ^{13}C tidak ditemukan adanya kebocoran dari fasilitas *leach pad* diatas badan disposal, dengan nilai isotop ^{13}C rembesan di Magazine berkisar pada groundwater DIC.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terimakasih kepada Program Studi Magister Teknik Airtanah,

Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung dan Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, karena berkat dukungannya Jurnal Geosains dan Teknologi ini dapat memuat hasil penelitian penulis

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, M., Jaya, A., Mawaleda, M., dan Nur, I. (2024). Geology and characteristics of epithermal gold mineralization at the Motongkad Prospect, North Sulawesi, Indonesia. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 40(1), 213–232. DOI: doi.org/10.24425/gsm.2024.149299
- Clark, I. D., dan Fritz, P. (1997): *Environmental isotopes in hydrogeology*, CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 328 .
- Hakim, A. Y. Al, Iskandar, I., Septianto, C. P., Suwarman, R., Fajrin, A., dan Putri, T. A. (2023). *Controls on the mineralogical and geochemical dispersion in soil and water around a tailing storage facility in the epithermal gold–silver mine in Central Kalimantan, Indonesia*. *Geochemistry*, 83(1).
- Kirsch, S. (2014). *Mining capitalism: The relationship between corporations and their critics*. University of California Press.
- Nugraha, G., dan Idrus, A. (2023). Karakteristik mineralisasi, geokimia, dan fluida hidrotermal pada endapan bijih epithermal di Sulawesi Utara. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Perelló, J. A. (1994). Geology, porphyry Cu–Au, and epithermal Cu–Au–Ag mineralization of the Tombulilato district, North Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1–3), 221–256. DOI: doi.org/10.1016/0375-6742(94)90026-4
- Pascayulinda, D., Widjaja, B., dan Wijaya, M. (2024). Analysis of chloride contaminant transport in tailings storage facility dam (Case study: Gold mine in Sumatra). *Journal of the Civil Engineering Forum*, 10(2), 187–198. DOI: doi.org/10.22146/jcef.9520
- PT. XYZ (2012): Laporan Feasibility Study (FS). Tidak dipublikasikan.
- Rofikoh, S., dan Iskandar, I. (2025). *Utilization of ²²²radon and stable isotope for investigating potential tailing storage leaks: A case study from Azurite Gold Mine, Central Kalimantan*. *Indonesian Journal on Geoscience*, 12(1), 65–74.
- Weihmann, J., Mansfeldt, T., dan Schulte, U. (2007). Stable carbon (12/13C) and nitrogen (14/15N) isotopes as a tool for identifying the sources of cyanide in wastes and contaminated soils-A method development. *Analytica Chimica Acta*, 582(2), 375–381. DOI: doi.org/10.1016/j.aca.2006.09.013
- Zhu, Y., An, F. dan Tan, J. (2011). Geochemistry of hydrothermal gold deposits: A review. *Geoscience Frontiers*, 2(3), 367–374. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.05.006