



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 3 (2025) pp: 8221-8226

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

---

## Evaluasi Kinerja Permeable Reactive Barrier Anaerobik dalam Pengolahan Air Asam Tambang Skala Pilot: Efektivitas dan Tantangan dalam Penyisihan Mangan

Hendra Sani

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia

[hendra.sani85@gmail.com](mailto:hendra.sani85@gmail.com)

### Abstrak

Air Asam Tambang (AAT) merupakan salah satu sumber pencemar utama di wilayah pertambangan yang mengandung pH rendah serta konsentrasi tinggi sulfat dan logam terlarut. Penelitian ini mengevaluasi kinerja Permeable Reactive Barrier (PRB) anaerobik pada skala pilot dalam pengolahan AAT di lokasi tambang PT. X, Kabupaten Paser, Kalimantan Timur, selama 12 bulan. Sistem PRB ini menggunakan campuran serpihan kayu, batu kapur, dan pupuk kandang sebagai media reaktif. Parameter yang dianalisis meliputi pH, TDS, besi (Fe), sulfat ( $SO_4^{2-}$ ), dan mangan (Mn), dengan hasil pengukuran menggunakan pH-meter, Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), serta ion chromatography. Hasil pemantauan menunjukkan adanya peningkatan pH dari  $3,8 \pm 0,3$  menjadi  $6,7 \pm 0,5$ , penurunan TDS sebesar 28%, pengurangan Fe sebesar 89%, dan pengurangan  $SO_4^{2-}$  sebesar 65%. Meskipun demikian, pengurangan Mn relatif kecil, hanya 14% dan tidak signifikan secara statistik. Temuan ini menunjukkan bahwa PRB anaerobik efektif dalam menetralkan AAT dan mengurangi logam berat tertentu, terutama Fe dan  $SO_4^{2-}$ , namun tidak efektif dalam mengendalikan Mn. Penelitian ini menyarankan desain PRB hybrid yang menggabungkan proses anaerobik dan aerobik untuk meningkatkan efisiensi penghilangan Mn. Selain itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk memahami lebih dalam mekanisme biogeokimia dan mikrobiologi yang terlibat. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi mitigasi AAT yang lebih berkelanjutan dan efisien di kawasan tropis.

*Kata kunci:* Air Asam Tambang; Permeable Reactive Barrier; Sulfate-Reducing Bacteria; Mangan; Remediasi Pasif.

### 1. Latar Belakang

Air hasil aktivitas pertambangan sering kali memiliki karakteristik sangat asam dan bermuatan tinggi dengan sulfat serta logam terlarut, kondisi yang dikenal sebagai Air Asam Tambang (AAT). Penambangan terbuka, meskipun seringkali lebih ekonomis, secara inheren menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan, seperti deforestasi yang luas, erosi tanah yang parah, dan pencemaran air yang meluas [1]. Proses oksidasi mineral sulfida—terutama pirit ( $FeS_2$ )—ketika terpapar oksigen dan air menghasilkan ion hidrogen dan sulfat yang menurunkan pH dan melepaskan unsur logam ke lingkungan perairan, sehingga menimbulkan dampak ekologi dan risiko kesehatan masyarakat. Kondisi demikian lazim ditemukan pada situs penambangan di berbagai belahan dunia, termasuk kawasan tropis yang sering menghadapi tantangan hidrologi musiman dan variasi debit. [2]

Strategi mitigasi AAT tradisional umumnya mengandalkan penetralan kimiawi (mis. penambahan kapur atau soda ash) yang efektif dalam jangka pendek tetapi berbiaya tinggi, menghasilkan residu lumpur yang harus dikelola, dan memerlukan operasi berkelanjutan. Oleh karena itu, pendekatan pasif yang memanfaatkan proses biogeokimia alami semakin diminati sebagai solusi berkelanjutan—salah satunya adalah penggunaan Permeable Reactive Barrier (PRB) [3]. PRB dioperasikan in situ sehingga aliran air tercemar melewati media reaktif yang memfasilitasi reaksi kimia dan biologis untuk menurunkan kontaminan. Ketika media mengandung bahan organik, lingkungan anaerob dapat berkembang dan mendukung aktivitas bakteri pereduksi sulfat (sulfate-reducing bacteria, SRB); SRB menggunakan donor karbon organik untuk mereduksi sulfat menjadi sulfida, yang kemudian bereaksi dengan logam terlarut membentuk endapan sulfida yang kurang larut. Pendekatan ini telah menunjukkan hasil yang menjanjikan pada pengurangan Fe, Zn, dan beberapa logam lain pada sejumlah studi lapangan dan pilot. [4][5]

Meski demikian, pengendalian mangan (Mn) tetap menjadi tantangan teknis. Berbeda dengan Fe yang mudah membentuk sulfida pada kondisi reduktif,  $Mn^{2+}$  lebih stabil dalam fase terlarut pada rentang Eh–pH yang sering dihasilkan oleh reaktor anaerobik, sehingga penghilangan Mn melalui mekanisme yang sama tidak selalu efektif. Untuk itu, beberapa studi mengusulkan penambahan unit oksidatif atau desain hybrid (anaerobik–aerobik) yang dapat mempromosikan oksidasi dan presipitasi Mn. Hasil-hasil lapangan dan percobaan sebelumnya menunjukkan variasi besar pada efisiensi penghilangan Mn tergantung pada konfigurasi reaktor, material reaktif, dan kondisi operasi lokal.[6][7][8]

Selain itu, penelitian oleh Robinson-Lora dan Brennan (2011) menunjukkan bahwa penghilangan mangan di dalam sistem anaerobik dapat terjadi melalui presipitasi rhodochrosite ( $MnCO_3$ ) dan sorpsi, dengan efisiensi yang lebih tinggi pada kondisi anaerobik tertentu[9]. Dalam hal ini, mangan menunjukkan penghilangan yang lebih efisien bila sistem pengolahan menggunakan mineral seperti dolomit yang dapat memfasilitasi reaksi oksidasi dan pembentukan endapan[10].

Penggunaan material seperti dolomit dalam PRB juga telah diperlihatkan dalam penelitian oleh Liang-Tong et al. (2023), yang menunjukkan bahwa dolomit dapat efektif menghilangkan mangan dari air tambang, dengan efisiensi yang bergantung pada faktor-faktor seperti pH dan waktu kontak, yang mempengaruhi kadar Mn yang terlarut[11].

Konteks penelitian terkini memperlihatkan beberapa inovasi telah dicoba untuk mengatasi keterbatasan Mn, seperti penambahan lapisan aerasi setelah PRB anaerobik, penggunaan material khusus (zeolit, oksida Mn), atau penerapan sistem hybrid anaerobik–aerobik [7]. Di Indonesia, penelitian oleh Anungstri et al. (2022) yang mengombinasikan fly ash dengan media organik melaporkan penghilangan logam hingga 94 %, menunjukkan bahwa adaptasi material lokal dapat meningkatkan performa system [12].

Kerangka teori inilah yang mendasari analisis penelitian ini: bahwa PRB anaerobik efektif untuk pH, Fe, dan  $SO_4^{2-}$ , tetapi memerlukan desain tambahan untuk Mn[3]. Dengan memahami mekanisme dasar dan keterbatasan dari literatur, hasil penelitian lapangan ini dapat ditempatkan dalam konteks ilmiah yang lebih luas dan relevan.

Berdasarkan permasalahan dan celah penelitian tersebut, studi ini bertujuan untuk menguji performa PRB anaerobik skala pilot di lokasi tambang tropis (PT. X, Kab. Paser) dengan fokus pada efektivitas penghilangan Mn relatif terhadap parameter lain (pH, TDS, Fe,  $SO_4^{2-}$ ) selama periode monitoring 12 bulan. Selain menilai efisiensi pengolahan, penelitian juga berupaya mengidentifikasi keterbatasan desain dan menyusun rekomendasi perbaikan desain yang aplikatif untuk kondisi daerah tropis.

## 2. Metode Penelitian

### Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di lokasi tambang batubara aktif di Kabupaten Paser Profinsi Kalimantan Timur, yang secara historis menghasilkan Air Asam Tambang (AAT) dengan pH rendah (<4) dan kandungan logam terlarut tinggi. Lokasi dipilih berdasarkan kriteria: (i) debit air relatif stabil sepanjang tahun, (ii) kandungan Fe, Mn, dan  $SO_4^{2-}$  melebihi baku mutu lingkungan, dan (iii) kemudahan akses untuk pemantauan rutin.

### Desain Permeable Reactive Barrier (PRB)

Sebuah reaktor PRB skala pilot dibangun menggunakan bak beton berkapasitas  $\pm 2 m^3$  (2 m panjang  $\times$  1 m lebar  $\times$  1 m tinggi) dengan sistem aliran horizontal. Inlet dan outlet dipasang dengan pipa PVC (diameter 2 inci) untuk mengontrol debit dan arah aliran. Media reaktif terdiri atas:

- **Serpihan kayu** (30 %) sebagai sumber karbon organik.
- **Batu kapur ( $CaCO_3$ )** (30 %) sebagai agen penetral pH.
- **Pupuk kandang sapi** (40 %) sebagai stimulan pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat (SRB).

Komposisi media disusun berlapis, dengan lapisan dasar batu kapur, lapisan tengah campuran organik, dan lapisan penutup berupa kerikil untuk menjaga distribusi aliran. Waktu tinggal hidrolik (Hydraulic Retention Time, HRT) rata-rata adalah 24–48 jam, dihitung berdasarkan volume efektif reaktor dan debit masuk.

### Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan setiap bulan selama 12 bulan ( $n = 12$ ). Sampel air diambil dari dua titik: **upstream (inlet AAT)** dan **downstream (outlet PRB)**. Setiap titik diambil duplikat teknis ( $2\times$ ) menggunakan botol polietilen 1 L yang telah diasamkan dengan  $\text{HNO}_3$  ultrapure (untuk analisis logam). Sampel disimpan pada suhu  $4^\circ\text{C}$  selama transportasi ke laboratorium dan dianalisis maksimal 24 jam setelah pengambilan.

### Analisis Laboratorium

Parameter yang dianalisis meliputi:

- **pH**: menggunakan pH meter digital (Hanna HI 2211) dengan kalibrasi buffer standar pH 4, 7, dan 10.
- **TDS**: dengan TDS meter portabel ( $\pm 1\%$  akurasi).
- **Fe dan Mn terlarut**: dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS, Perkin Elmer AAnalyst 400) dengan LOD masing-masing 0,01 mg/L (Fe) dan 0,005 mg/L (Mn).
- **Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**: ditentukan menggunakan metode ion chromatography (Dionex ICS-1100) atau metode turbidimetri  $\text{BaCl}_2$  (APHA 4500- $\text{SO}_4^{2-}$  E, 2017) bila peralatan IC tidak tersedia.

### Quality Assurance dan Quality Control (QA/QC)

Untuk menjamin validitas data, dilakukan langkah-langkah QA/QC sebagai berikut:

1. **Kalibrasi instrumen** setiap hari pengukuran menggunakan standar bersertifikat.
2. **Blanko** (air ultrapure) untuk mendeteksi kontaminasi silang.
3. **Spiked samples** (penambahan standar Fe, Mn,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) dengan recovery 85–110 %.
4. **Duplikasi analisis** untuk minimal 10 % sampel.
5. **LOD dan LOQ** dihitung sesuai pedoman USEPA (2016).

### Analisis Statistik

Data dianalisis menggunakan perangkat lunak **IBM SPSS Statistics v26**.

- Normalitas diuji dengan **Shapiro–Wilk test** ( $\alpha = 0,05$ ).
- Bila data normal  $\rightarrow$  digunakan **uji t berpasangan** untuk membandingkan upstream vs downstream.
- Bila data tidak normal  $\rightarrow$  digunakan **Wilcoxon Signed-Rank Test**.
- Efisiensi penghilangan dihitung dengan rumus:

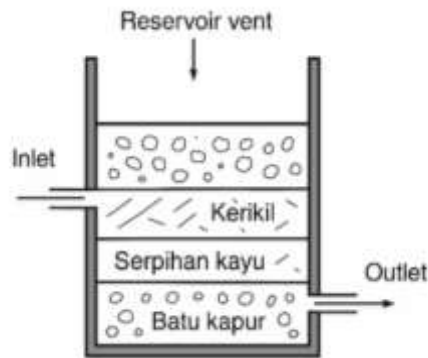
$$\text{Efisiensi}(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100$$

- Tingkat signifikansi ditetapkan pada  **$p < 0,05$** .
- Selain p-value, juga dihitung ukuran efek (Cohen's d) untuk parameter signifikan.

**Tabel 1. Parameter pengambilan Sampel air diambil bulanan dari inlet (upstream) dan outlet (downstream) sepanjang 12 bulan**

Parameter	Metode Analisis	Instrumen / Merk & Model	LOD / LOQ	Replikasi
<b>pH</b>	pH-meter digital, kalibrasi buffer pH 4, 7, 10 setiap minggu	Hanna Instruments HI 2211	$\pm 0,01$ pH	triplikat
<b>TDS</b>	TDS-meter atau konduktivitas dikonversi	Hach HQ40d multi-parameter meter	$\pm 10$ mg/L	triplikat
<b>Fe, Mn</b>	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) / atau ICP-OES jika tersedia	Perkin Elmer AAnalyst 400	Fe: $\pm 0,01$ mg/L, Mn: $\pm 0,005$ mg/L	duplikat teknis
<b>Sulfat (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>)</b>	Ion chromatography atau metode turbidimetri (APHA Standard 4500- $\text{SO}_4^{2-}$ -E, 2017)	Hach DR 3900 UV-Vis Spectrophotometer	$\pm 1$ mg/L	duplikat

Semua sampel dianalisis dengan kontrol kualitas (QA/QC): blank, spike recovery, dan standar referensi. Normalitas data diuji dengan uji Shapiro-Wilk. Untuk data yang mengikuti distribusi normal, digunakan uji t-berpasangan (paired t-test); jika tidak normal, digunakan Wilcoxon Signed-Rank Test. Signifikansi diuji pada  $\alpha = 0,05$ .



Gambar 1. Skema Reaktor PRB Anaerobik Skala Pilot

### 3. Hasil dan Diskusi

#### Perubahan Kualitas Air Asam Tambang setelah Perlakuan PRB

Monitoring dilakukan selama 12 bulan ( $n = 12$  pasang data upstream–downstream). Rata-rata hasil pengukuran parameter kualitas air ditampilkan pada Tabel 1.

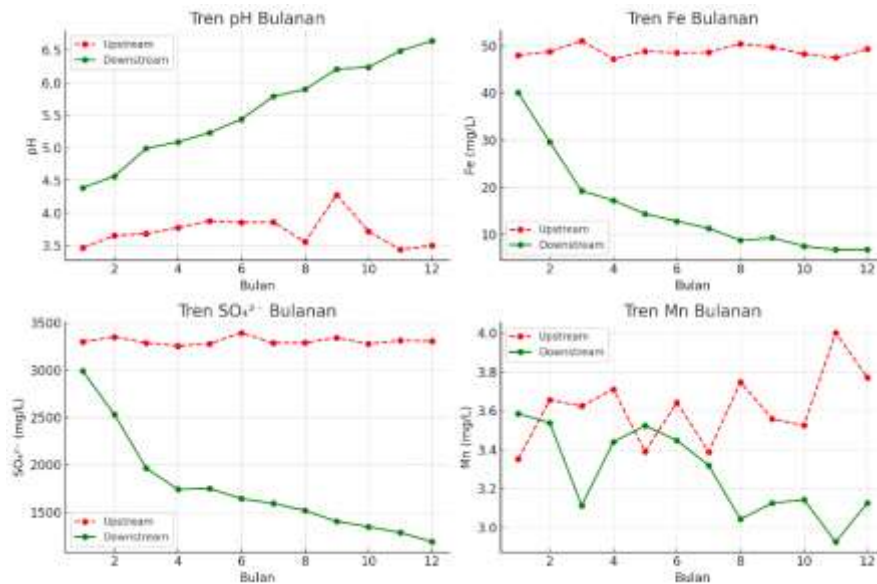
**Tabel 2. Rata-rata parameter kualitas air sebelum (upstream) dan sesudah (downstream) melewati PRB anaerobik**

Parameter	Upstream ( $\pm$ SD)	Downstream ( $\pm$ SD)	Penurunan / Perubahan	Nilai p	Interpretasi
<b>pH</b>	3,8 $\pm$ 0,3	6,7 $\pm$ 0,5	↑ netralisasi ( $\approx +76\%$ )	<0,001	Signifikan
<b>TDS (mg/L)</b>	2600 $\pm$ 320	1880 $\pm$ 280	↓ 28 %	0,004	Signifikan
<b>Fe (mg/L)</b>	48 $\pm$ 6	5 $\pm$ 2	↓ 89 %	<0,001	Signifikan
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</b>	3300 $\pm$ 350	1150 $\pm$ 200	↓ 65 %	<0,001	Signifikan
<b>Mn (mg/L)</b>	3,6 $\pm$ 0,7	3,1 $\pm$ 0,6	↓ 14 %	0,27	Tidak signifikan

**Catatan:** nilai p dihitung menggunakan uji t-berpasangan untuk data normal (pH, TDS, Fe, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) dan uji Wilcoxon untuk data tidak normal (Mn).

#### Deskripsi Statistik

- pH:** Terjadi peningkatan konsisten dari kondisi sangat asam (3,8) menjadi mendekati netral (6,7). Perubahan ini signifikan ( $p < 0,001$ ) dan memiliki ukuran efek besar (Cohen's  $d > 2,0$ ).
- TDS:** Konsentrasi total zat terlarut turun signifikan sebesar 28 % ( $p = 0,004$ ), menunjukkan bahwa PRB mampu menahan sebagian besar anion/kation dari larutan AAT.
- Fe:** Penurunan mencapai 89 % dan signifikan tinggi ( $p < 0,001$ ). Nilai downstream (5 mg/L) mendekati baku mutu air tambang di banyak regulasi internasional.
- Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>):** Berkurang dari 3300 mg/L menjadi 1150 mg/L (~65 %), juga signifikan ( $p < 0,001$ ). Hal ini menegaskan peran bakteri pereduksi sulfat (SRB) dalam mengonsumsi sulfat.
- Mn:** Penurunan hanya 14 % dan tidak signifikan ( $p = 0,27$ ). Variasi temporal cukup tinggi; pada beberapa bulan tertentu, konsentrasi Mn hampir tidak berubah. Tren Temporal



**Gambar 2. Grafik Tren Bulanan** untuk pH, Fe, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, dan Mn.

Grafik tren bulanan (Gambar 2) menunjukkan bahwa:

- Peningkatan pH terjadi stabil sejak bulan pertama, kemudian cenderung plateau di bulan ke-6 hingga ke-12.
- Penurunan Fe dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> signifikan sejak bulan ke-3, menandakan terbentuknya kondisi reduktif dan koloni mikroba aktif.
- Mn berfluktuasi tanpa pola jelas; pada musim penghujan (bulan ke-4–6) bahkan terjadi sedikit peningkatan konsentrasi.

#### Perbandingan dengan Literatur

- Penurunan Fe (89 %) dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (65 %) pada penelitian ini sejalan dengan studi [5] yang melaporkan pengurangan Fe >80 % dan sulfat 70–90 % di reaktor PRB berbasis SRB.
- Peningkatan pH dari 3,8 menjadi 6,7 konsisten dengan temuan [13] di Kanada, di mana PRB meningkatkan pH hingga mendekati netral setelah satu tahun operasi.
- Hasil penghilangan Mn yang rendah (14 %) sesuai dengan review [6] dan studi [7] yang menekankan bahwa Mn membutuhkan modul oksidatif tambahan.
- Perbandingan dengan penelitian [8] di Kolombia memperlihatkan bahwa penghilangan Mn lebih tinggi (48–66 %) ketika PRB dilengkapi unit terbuka yang memungkinkan oksidasi. Hal ini menegaskan perlunya desain hybrid untuk meningkatkan performa Mn di PRB tropis. PRB terbukti efektif meningkatkan pH, menurunkan TDS, Fe, dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, sejalan dengan mekanisme teoritis dan literatur [5][13]. Penurunan Fe (89 %) menegaskan peran presipitasi sulfida logam, sedangkan penurunan sulfat (65 %) mencerminkan aktivitas SRB.
- Sebaliknya, Mn hanya berkurang 14 % dan tidak signifikan. Hal ini konsisten dengan teori bahwa Mn<sup>2+</sup> tidak mudah diendapkan dalam kondisi anaerob, karena membutuhkan oksidasi atau mikroba pengoksidasi Mn [6]. Studi Kolombia membuktikan bahwa unit terbuka/oksidatif dapat meningkatkan penghilangan Mn hingga 66 % [8].
- Implikasinya, penerapan PRB tropis memerlukan desain hybrid atau multi-unit untuk menysasar Mn. Keterbatasan penelitian ini adalah ketiadaan data Eh, alkalinitas, sulfida terlarut, dan analisis mikrobiologi, sehingga mekanisme hanya dapat dihipotesiskan.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa **Permeable Reactive Barrier (PRB) anaerobik skala pilot** mampu berfungsi efektif dalam memperbaiki kualitas Air Asam Tambang (AAT) di wilayah tropis. Hasil menunjukkan bahwa sistem ini secara konsisten: a). Meningkatkan ph dari kondisi sangat asam menuju mendekati netral, b).

Menurunkan TDS sekitar seperempat dari total kandungan awal, c). Secara signifikan mengurangi konsentrasi Fe (hampir 90%) dan sulfat (sekitar dua pertiga). Temuan ini mengindikasikan bahwa kombinasi media organik, batu kapur, dan pupuk kandang memberikan kondisi yang mendukung proses netralisasi dan presipitasi logam, terutama melalui peran bakteri pereduksi sulfat (SRB). Namun demikian, efisiensi penyisihan Mn terbukti rendah dan tidak signifikan. Hal ini menegaskan keterbatasan sistem anaerob murni dalam mengendalikan  $Mn^{2+}$ , sehingga diperlukan integrasi dengan unit pascaratmen bersifat oksidatif atau desain hybrid (anaerob-aerob) untuk mencapai hasil yang lebih komprehensif. Secara praktis, penerapan PRB di lingkungan tropis dapat menjadi strategi mitigasi yang berkelanjutan dan berbiaya relatif rendah, tetapi harus dioptimalkan melalui desain multi-lapisan, pengaturan waktu tinggal hidrolis yang memadai, serta pemanfaatan material lokal yang tersedia. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (i) mengukur parameter hidrogeokimia kunci seperti Eh, alkalinitas, dan sulfida terlarut; (ii) melakukan karakterisasi mineralogi dan mikrobiologi guna memvalidasi mekanisme kerja PRB; serta (iii) menguji umur pakai dan efektivitas PRB dalam jangka panjang.

## Referensi

- [1] H. Sani and S. Syamsuddin, "Konflik Penambangan Nikel di Raja Ampat: Analisis Etika Lingkungan dan Rekayasa Pertambangan untuk Konservasi Berkelanjutan," *RIGGS J. Artif. Intell. Digit. Bus.*, vol. 4, no. 2, pp. 3453–3461, 2025, doi: 10.31004/riggs.v4i2.1041.
- [2] D. B. Johnson and K. B. Hallberg, "Acid mine drainage remediation options: a review," *Sci. Total Environ.*, vol. 338, no. 1–2, pp. 3–14, 2005, doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.09.002.
- [3] P. L. Younger, "Mine water pollution in Scotland: nature, extent and preventative strategies," *Sci. Total Environ.*, vol. 294, no. 1–3, pp. 163–183, 2002, doi: 10.1016/S0048-9697(02)00061-9.
- [4] O. Gibert, J. de Pablo, J. L. Cortina, and C. Ayora, "Treatment of acid mine drainage by sulphate-reducing bacteria using permeable reactive barriers: a review," *Miner. Eng.*, vol. 15, no. 5, pp. 423–430, 2002, doi: 10.1016/S0892-6875(02)00064-9.
- [5] C.-M. Neculita, G. J. Zagury, and B. Bussière, "Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulphate-reducing bacteria: critical review and research needs," *J. Environ. Qual.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–16, 2007, doi: 10.2134/jeq2006.0066.
- [6] C. J. Gandy and P. L. Younger, "Geochemical modelling of manganese attenuation in mine water treatment systems," *Mine Water Environ.*, vol. 22, no. 4, pp. 190–200, 2003, doi: 10.1007/s10230-003-0024-1.
- [7] J. Skousen, C. E. Zipper, A. Rose, and others, "Review of passive systems for acid mine drainage treatment," *Mine Water Environ.*, vol. 36, pp. 133–153, 2017, doi: 10.1007/s10230-016-0417-1.
- [8] I. Sánchez-Andrea and others, "Passive multi-unit field-pilot for acid mine drainage remediation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 413, p. 125407, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125407.
- [9] M. A. Robinson-Lora and R. A. Brennan, "Anaerobic precipitation of manganese and co-existing metals in mine impacted water treated with crab shell-associated minerals," *Appl. Geochemistry*, vol. 26, no. 5, pp. 853–862, 2011, doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.02.006.
- [10] S. M. Riekert, R. J. Winston, and L. E. Burris, "Pervious concrete for treatment of acid mine drainage: Neutralization of pH and removal of dissolved iron, aluminum, manganese, and copper," *J. Environ. Manage.*, vol. 375, p. 124188, 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.124188.
- [11] Z. Liang-Tong, Z. Li, Y. Yuqing, H. Na, and B. Bate, "Investigation of aqueous Fe(III) and Mn(II) removal using dolomite as a permeable reactive barrier material," *Environ. Technol.*, vol. 44, no. 14, pp. 2039–2053, 2023, doi: 10.1080/09593330.2021.2020340.
- [12] R. Anungstri, H. T. B. M. Petrus, and A. Prasetya, "Removal of Sulphate and Heavy Metals from Acid Mine Drainage using Permeable Reactive Barrier Technique," in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2022, p. 12059. doi: 10.1088/1755-1315/1065/1/012059.
- [13] S. G. Benner, D. W. Blowes, and C. J. Ptacek, "Long-term performance of a passive barrier for mine drainage treatment at the Nickel Rim mine site, Sudbury, Ontario," *Water Resour. Res.*, vol. 35, no. 9, pp. 2721–2732, 1999, doi: 10.1029/1999WR900148.