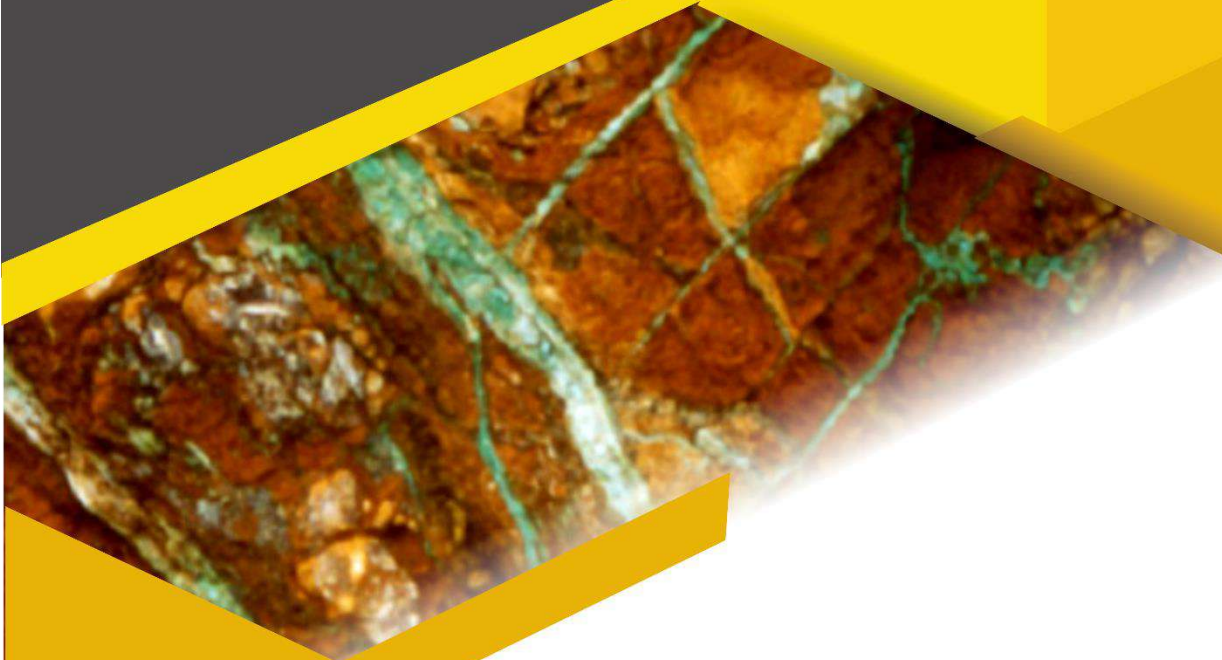




Prosiding Seminar Nasional "40 Tahun Pandu Berbakti"



**TEKNIK PERTAMBANGAN, FTM-LPPM
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA**

2022

Prosiding Seminar Nasional “40 Tahun Pandu Berbakti”

Steering Committee

Ir. Priyadi (Komting 82, Dirut PT. Adaro, Tbk.)

Ir. Putra Slamet Abadi

Ir. Yosep Yudianto

Organizing Committee

Ketua Pelaksana : Ir. Bambang Purwono

Wakil Ketua I : Dr. Ir. Waterman Sulistyana Bargawa, MT., IPM.

Sekretaris : Ir. Amiseno, Ir. Heru Siswandono, Ir. Heru Siswandono,
Ir. Purwoko Yulianto

Bendahara : Ir. Iryono Adi, Ir. Oki Widiyanto

Humas & Publikasi : Ir. Basuki Trubus Wicaksono

Acara : Ir. Agus Panca Suchyo, MT., Ir. M. Mochtar Chodlori, MBA

Kesekretariatan : Agus Sugiharto, MT

Distribusi : Ir. Bagus Wiyono, MT

Reviewer

Dr. Arifudin Idus UGM

Dr. Nur Heriawan ITB

Dr. Syafrizal ITB

Dr. Supandi ITNY

Dr. Waterman Sulistyana Bargawa UPNVY

Dr. Shofa Rijalul Haq UPNVY

Dr. Aldin Ardian UPNVY

Dr. Nur Ali Amri UPNVY

Editor

Ir. Saiful Kirom

Ir. Trisno Yuwono

Ir. Florentinus Agung Widodo

Ir. Heru Siswandono

Managing Editor

Ir. Eka Budhi Mahatma

Ir. Arif Budi Prasetyanto

Ir. Dadik Kiswanto

Ir. Henrico Syambastian

Risal Gunawan, ST.

Arद्या Pramesti Putri Arindry, ST.

Anisyah Alqurani, ST.

Sofiannur, ST.

Cetakan Tahun 2022

Katalog Dalam Terbitan (KDT):

Prosiding Seminar Nasional “40 Tahun Pandu Berbakti”

Penerbit LPPM UPN Veteran Yogyakarta vi + 140 hlm; (21 × 29.7) cm².

ISBN: 978-623-389-202-5

Redaksi

Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Sekretariat: Gd. Ari F. Lasut ALC I UPN “Veteran” Yogyakarta

Jl. Padjadjaran 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Yogyakarta 55283

Telepon (0274) 486733, ext 154, Fax. (0274) 486400

E-mail: lppm@upnyk.ac.id

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apa pun, termasuk fotokopi, tanpa izin tertulis dari penerbit.

**PRAKATA KETUA PANDU TEKNIK PERTAMBANGAN FTM
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN”
YOGYAKARTA
2022**

Puji syukur tim editor panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga Seminar Nasional 40 Tahun Pandu Berbakti dapat terlaksana dengan baik dan lancar. Seminar ini bertema “*Fleksibilitas Alumni Tambang dalam Berkarya dengan Semangat Bela Negara*” yang diselenggarakan dalam rangka reuni Alumni Tambang “82” Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta Tahun 2022.

Pada seminar dipresentasikan hasil penelitian, review, dan hasil pengabdian yang dilakukan oleh peneliti yang berasal baik dari perguruan tinggi maupun praktisi perusahaan pertambangan. Hasil seminar tersebut kemudian didokumentasikan dalam prosiding ini.

Seminar ini dapat terlaksana dengan sukses atas bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu kami ucapkan terima kasih pihak-pihak yang telah membantu terselenggaranya acara ini.

Semoga prosiding ini bermanfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Yogyakarta, 09 Desember 2022

Ketua Pandu 82
Ir. Putra Slamet Abadi

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN IDENTITAS PROSIDING	ii
PRAKARTA KETUA ALUMNI TAMBANG ANGKATAN "82"	iv
DAFTAR ISI	v
Analisis Kelas Massa Batuan dengan Metode Q-System Terowongan Tambang Bawah Tanah Ardy Pramesti Putri Arindry, Singgih Saptono dan Barlian Dwinagara	1
Analisis Jarak Lubang Bor untuk Klasifikasi Sumberdaya Batubara Studi Kasus Cekungan Tarakan Kalimantan Utara Septi Wulandari, Eddy Winarno, dan Nur Ali Amri	8
Pentingnya Perencanaan Lahan Pascatambang Literatur Review Risal Gunawan, Rika Ernawati dan Rahmat Fauzan Izza	16
Evaluasi Pemanfaatan Limbah Slag Nikel pada Pengolahan Biji Nikel Laterit (Studi kasus Pengolahan Biji Nikel Laterit Halmahera Selatan), Sahrul Huda, Tedy Agung Cahyadi, Rika Ernawati, Edy Nursanto, dan Nur Ali Amri	25
Pengelolaan Lahan Pascatambang Berbasis Berkelanjutan Literatur Review Risal Gunawan, Waterman Sulistyana Bargawa, dan Nur Ali Amri	32
Comparison of VES and IPI2WIN Result with Drilling Groundwater at Wonogiri Garmen Factory Project Site Winda	41
Studi Karakteristik Geologi Dalam Penentuan Lokasi As Calon Bendungan Di Sungai Nungga Kota Bima Husni Randa, Barlian Dwinagara, Muhammad Fathin Firaz dan Arif Wijaya	50
Analisis Penurunan Muka Tanah Akibat Beban Fondasi Dangkal Pada Calon Bendungan Dodu Rasanae Timur Kota Bima Nusa Tenggara Barat Husni Randa, Barlian Dwinagara, Muhammad Fathin Firaz, Diah Rahmawati dan, Alpiana	60
Literatur Review Pemanfaatan Limbah Slag Nikel pada Kegiatan Pengolahan Bijih Nikel Sahrul Huda Ode Sam, Tedy Agung Cahyadi, Rika Ernawati, Edy Nursanto, dan Nur Ali Amri	70

Study of the Mineralogical Characteristics of Laterite Nickel Deposit Wailukum Block PT. Aneka Tambang Tbk. Geomin Units East Halmahera District North Maluku Province Fahrudin Sahid dan Jeha Kunramadi	79
Overview Metode Pengelolaan Air Asam Tambang Menggunakan Bakteri Pereduksi Sulfat Anisyah Alquran Ni, Rika Ernawati, Tedy Agung Cahyadi, Edy Nursanto, dan Nur Ali Amri	89
Estimasi Sumberdaya Batubara berdasarkan Uji Prospek Beralasan Kode KCM I 2017 Eko Wicaksono	96
Tinjauan Literatur Identifikasi dan Potensi Rare Earth Element Epafras Meihaga dan Waterman Sulistyana Bargawa	104
Overview Metode Pengelolaan Limbah Tailing Akibat Kegiatan Pertambangan Emas Fitra Kurniawan, Tedy Agung Cahyadi, Rika Ernawati, Waterman Sulistyana Bargawa, dan Nur Ali Amri	111
Perbandingan Hasil Estimasi Kadar Bijih Nikel Laterit dengan Metode Inverse Distance Weighting dan Ordinary Kriging Berdasarkan Literatur Review Muh Ardian Syaputra, Aviv Alansyah dan Muh Nuzul Haq	116
Estimasi Sumberdaya Endapan Nikel Laterit Sulawesi Tengah dengan Metode metode inverse distance weighted Gede Yangda Sugianto, Waterman Sulistyana Bargawa, Dahono Haryanto	122
Estimasi cadangan memakai pendekatan lerch Grossman Studi Kasus Bijih Nikel Laterit di Bahodopi Sulawesi Tengah Muh. Ardian Syaputra, Risal Gunawan, Waterman Sulistyana Bargawa	128
Estimasi Sumberdaya Endapan Nikel Laterit Sulawesi Tengah dengan Metode Ordinary Kriging Gede Yangda Sugianto, Waterman Sulistyana Bargawa, Dahono Haryanto	135

Overview Metode Pengelolaan Air Asam Tambang Menggunakan Bakteri Pereduksi Sulfat

Anisyah Alquran Ni^{1, a)}, Rika Ernawati^{1, b)}, Tedy Agung Cahyadi^{1, c)}, Edy Nursanto^{1, d)}, Nur Ali Amri^{1, e)}

¹Faculty of Mineral Technology, UPN Veteran Yogyakarta, Jl. SWK No.104 (Lingkar Utara), Ngropoh, Condongcatur, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

^{a)}Corresponding author: rika.ernawati@upnyk.ac.id

^{b)} 212211009@student.upnyk.ac.id, ^{c)} tedyagungc@upnyk.ac.id

^{d)} edynursanto@upnyk.ac.id, ^{e)} nuraliamri@upnyk.ac.id

Abstrak. Air asam tambang merupakan limbah yang dapat mengganggu kestabilan ekosistem terutama ekosistem aquatic. Air asam tambang terbentuk dari air lindi kegiatan penambangan mineral/batubara yang mengandung mineral sulfida dan terpapar oksigen. Air asam tambang ditandai dengan pH air yang rendah dan konsentrasi logam berat yang tinggi. Untuk meminimalisir dampak dari air asam tambang diperlukan metode pengelolaan yang efektif dan efisien salah satunya dengan menggunakan bioremediasi dengan memanfaatkan aktivitas bakteri pereduksi sulfat. Penelitian ini mengidentifikasi metode remediasi dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat yang ditinjau dari beberapa aspek penunjang pertumbuhan aktifitas bakteri pereduksi sulfat.

Kata kunci: Air asam tambang, bioremediasi, bakteri pereduksi sulfat

Abstract. Acid mine water is a waste that can disrupt the stability of ecosystems, especially aquatic ecosystems. Acid mine water is formed from leachate water of mineral/coal mining activities containing sulfide minerals and exposed to oxygen. Acid mine water is characterized by a low pH of water and a high concentration of heavy metals. To minimize the impact of acid mine water, effective and efficient management methods are needed, one of which is by using bioremediation by utilizing the activity of sulfate-reducing bacteria. This study identified a remediation method using sulfate-reducing bacteria in terms of several aspects supporting the growth of sulfate-reducing bacteria activity.

Keywords: Acid mine drainage, bioremediation, sulfate reducing bacteria.

11.1 PENDAHULUAN

Pengelolaan air asam tambang (AAT) menggunakan bakteri pereduksi sulfat (BPS) merupakan salah satu metode pasif. Seperti yang kita ketahui terdapat beberapa cara dalam pengelolaan air asam tambang seperti netralisasi dengan menambahkan material alkali namun cara tersebut tergolong mahal dan menghasilkan lumpur atau second waste dalam jumlah yang besar. Untuk mengatasi permasalahan tersebut peneliti terus melakukan inovasi sehingga ditemukan metode perawatan air asam tambang yang lebih efisien dengan menggunakan metode pasif secara biologis yang memanfaatkan bakteri pereduksi sulfat. Bakteri pereduksi sulfat merupakan sekelompok bakteri anaerob yang sangat beragam secara taksonomi dan mampu mereduksi sulfat menjadi endapan sulfida [1]. Dalam hal ini peneliti telah melakukan berbagai macam eksperimen yang ditinjau dari berbagai aspek untuk menemukan faktor apa saja yang mempengaruhi kemampuan dan meningkatkan efektifitas bakteri dalam mereduksi sulfat.

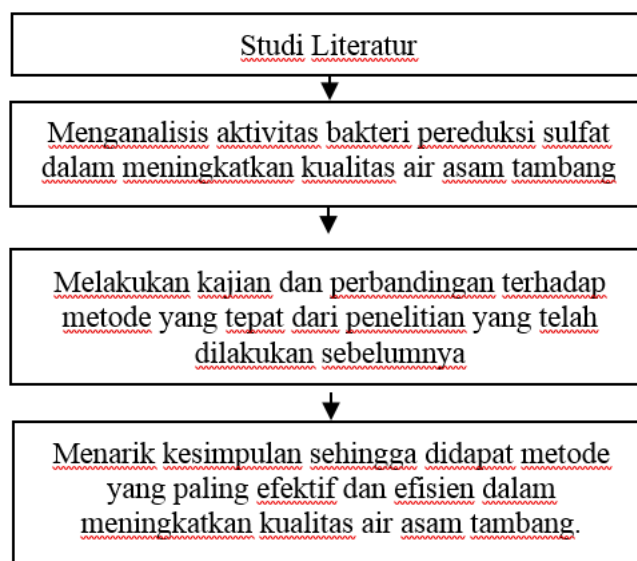
11.2 KAJIAN PUSTAKA

Air asam tambang merupakan masalah global dan berdampak buruk terhadap lingkungan. Air asam tambang memiliki pH yang rendah dan kandungan logam berat yang tinggi, kondisi tersebut berbahaya bagi makhluk hidup disekitarnya. Berbagai macam metode dalam mengelola air asam tambang telah dikembangkan namun masih kurang

efektif dan efisien. Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat dalam mengameliorasi kualitas air asam tambang telah banyak dikembangkan dan memiliki tingkat efektifitas yang cukup baik. Penggunaan bakteri pereduksi sulfat untuk pengelolaan air asam tambang memiliki beberapa manfaat seperti *second waste* yang dihasilkan rendah dan *recovery* logam yang tinggi [2]. Bakteri pereduksi sulfat merupakan bakteri yang memanfaatkan sulfat sebagai akseptor elektron [3]. Meskipun ada beberapa bakteri lainnya yang memanfaatkan sulfat dalam metabolismenya, namun bakteri pereduksi sulfat memanfaatkan H₂S sebagai sumber utama dalam metabolismenya [4]. Reduksi sulfat merupakan proses langsung yang memerlukan 10 sampai 100 folds sulfur. Metabolisme bakteri ini pada dasarnya oksidatif, memerlukan sebuah sistem sitokrom, dan rantai pernapasan fosforilasi.

11.3 METODE DAN MATERIAL

Penelitian ini dirangkum dari beberapa karya ilmiah tentang metode pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat. Penelitian ini dilakukan bertujuan sebagai acuan dalam memperbaiki kualitas air asam tambang. Tahapan penelitian yang dilakukan penulis dijabarkan dalam bentuk diagram alir yang terlihat pada gambar 1.



GAMBAR 1. Tahapan Penelitian

11.4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioremediasi menggunakan bakteri pereduksi sulfat yang telah dilakukan kajian dalam penyerapan logam berat pada air terkontaminasi dijabarkan pada beberapa sub bab dibawah ini:

a. Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Injeksi Substrat Ke Dalam *Subsurface*

Pengelolaan air asam tambang dengan sistem ini menginjeksi substrat organik ke bawah permukaan tanah melalui lubang bor. Substrat organik merupakan sumber karbon dan donor elektron bagi bakteri dimana komponen ini penting dalam menunjang pertumbuhan bakteri pereduksi sulfat. Substrat organik di injeksikan ke dalam *subsurface* yang di konfirmasi terkontaminasi air asam tambang. Pada metode ini kondisi bakteri pereduksi sulfat yang berada dibawah tanah minim akan oksigen tetap mampu mereduksi sulfat dengan optimal memperkuat pernyataan bahwa penggunaan bakteri pereduksi sulfat dalam pengelolaan air asam tambang dapat dimanfaatkan meskipun dalam kondisi yang ekstrem.

b. Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Memanfaatkan *Permeable Reactive Barriers*

Permeabilitas dari reactive barriers sangat berpengaruh terhadap keefektifan metode ini, karena semakin tinggi permeabilitas reactive barriers maka semakin intens kontak antara substrat organik dengan aliran air tanah yang terkontaminasi. Sehingga meningkatkan kemampuan bakteri dalam mereduksi sulfat. Untuk meningkatkan permeabilitas substrat organik dapat dicampurkan dengan kerikil. Pemilihan substrat organik yang digunakan juga mempengaruhi permeabilitas dan reaktifitas barriers. *Permeable Reactive Barriers* terdiri dari zona bahan reaktif yang dipasang melintasi jalur aliran air tanah yang terkontaminasi. Saat air tanah yang terkena dampak air asam tambang mengalir melalui zona ini, bakteri pereduksi sulfat mengurangi sulfat dari air dengan menggunakan sumber elektron yang ada pada barrier. Hal ini menghasilkan alkalinitas bikarbonat dan presipitasi logam sebagai sulfida.

c. Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Menggunakan *Infiltration Beds*

Metode pengelolaan dengan menggunakan *infiltration beds* prinsipnya sama dengan *Permeable Reactive Barriers* dimana pembuatan paritan dengan bagian bawahnya di lapis substrat organik yang mampu meningkatkan perkembangan bakteri pereduksi sulfat. Air yang terkontaminasi akan mengalir melalui paritan sehingga terjadi kontak dengan substrat organik yang berada pada bagian bawah paritan mengakibatkan aktifitas bakteri meningkat sekaligus terjadinya peningkatan reduksi sulfat oleh bakteri. Agar kondisi anaerobik dapat diciptakan substrat organik dilapisi impermeable liner. Bahan organik dapat dilengkapi dengan nutrisi dan inokulum reduksi sulfat untuk meningkatkan efisiensi lapisan infiltrasi. Bahan juga harus memiliki konduktivitas hidrolis yang sesuai, sehingga air mengalir melalui material dalam waktu yang diinginkan.

d. Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Menggunakan *Anoxic Ponds*

Anoxic pond dapat diartikan sebagai kolam atau cekungan yang memiliki material substrat organik pada lapisan bagian bawah sebagai sumber untuk bakteri pereduksi sulfat berkembang. Mekanisme atau proses terjadinya reduksi sulfat oleh bakteri hampir sama dengan metode sebelumnya yaitu *Permeable Reactive Barriers* dan *Infiltration Beds*. Dalam penggunaan metode ini hal yang perlu diperhatikan yaitu permeabilitas substrat, kandungan oksigen dalam sistem, dan pemilihan substrat organik yang dapat meningkatkan efektifitas bakteri dalam mereduksi sulfat. Apabila sulfat dapat direduksi sehingga terjadinya pengendapan sulfida bersamaan dengan pengendapan logam berat maka pH air asam tambang akan meningkat dan memperbaiki kualitas air. Menelaah kembali tentang bakteri pereduksi sulfat yang mampu berkembang pada pH rendah dan lingkungan tanpa oksigen sehingga metode pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan *anoxic pond* memungkinkan bakteri untuk berkembang dan mereduksi sulfat.

e. Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Menggunakan *Wetland*

Wetland telah diakui selama beberapa tahun sebagai sistem berbiaya rendah untuk meningkatkan kualitas air asam tambang. *Wetland* adalah ekosistem yang sangat kompleks, di mana kualitas air dipengaruhi oleh sejumlah proses fisik, kimia dan biologis termasuk pengenceran, penyaringan partikel tersuspensi, adsorpsi, kompleksitas, pertukaran ion dan penyerapan logam, dan presipitasi secara oksidatif maupun reduktif. Sistem *Wetland* dapat diklasifikasikan sebagai lahan basah aerobik dan anaerob. *Aerobic wetlands* yang dibangun dangkal dan tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan reaksi oksidasi dan hidrolisis besi dan logam berat lainnya, dan untuk mempertahankan endapan logam yang dihasilkan oleh pengendapan. Pengelolaan dengan menggunakan *Aerobic wetland* sangat cocok digunakan untuk *net alkaline waters* karena hidrolisis logam menghasilkan keasaman.

Penanaman tanaman berfungsi untuk mengatur aliran air dan menstabilkan endapan yang terakumulasi sehingga meminimalisir terjadinya erosi. Pada metode ini *wetland* dilengkapi dengan substrat organik dan batu kapur yang berada pada dasar *wetland*, *wetland* ini disebut *Anaerobic wetlands*. Dengan adanya kontak antara air terkontaminasi dengan substrat organik dan batu kapur sehingga akan menghasilkan alkalinitas. Hidrogen sulfida biogenik mengendapkan logam sebagai sulfida. Vegetasi yang tumbuh pada substrat yang terendam dapat memberikan pasokan karbon dan energi untuk keberlangsungan hidup mikroba yang berkembang didalam sistem dan melindungi terhadap erosi angin apabila terjadinya penurunan permukaan air dibawah permukaan substrat. Selain memberikan dampak positif pertumbuhan tanaman juga memberikan dampak negatif seperti difusi oksigen dari akar ke substrat disekitarnya. Jumlah tanaman yang melebihi kebutuhan juga dapat mengundang habitat muskrat yang dapat mengganggu proses remediasi. Oleh karena itu dibutuhkan maintenance yang rutin untuk tetap menjaga kestabilan *Anaerobic wetlands*. Untuk dapat mengoptimalkan fungsi *wetland* sebaiknya pengelolaan dilakukan dengan mengkombinasikan *Aerobic wetlands* dan *Anaerobic wetlands*.

f. Pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan *Anaerobic Stirred Batch Reactor (ASBR)*

Sulfat merupakan senyawa yang tergolong chemical inert, tidak mudah menguap, dan tidak beracun [6], namun konsentrasi sulfat yang tinggi dapat memberikan dampak buruk terhadap lingkungan dan mengganggu kestabilan ekosistem. Dengan menggunakan bakteri pereduksi sulfat yang akan mereduksi sulfat menjadi sulfida sehingga menyebabkan konsentrasi logam berat terendapkan secara kimiawi. Seiring berkurangnya konsentrasi logam berat dampak buruk yang ditimbulkan juga akan terminimalisir. Reaktor ASBR merupakan reaktor yang dilengkapi dengan *fiberglass jacket* dan sistem sirkulasi air yang berfungsi untuk mempertahankan temperatur sekitar 30°C. Reaktor ASBR dilengkapi dengan sistem operasi yang memiliki three-blade propeller yang digunakan untuk pencampuran. *Perforated steel basket* yang ada pada reaktor ASBR berfungsi untuk memberikan proteksi yang maksimal terhadap biomassa sehingga kehilangan biomassa dapat diminimalisir selama proses *liquid withdrawals*.

g. Pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan up-flow anaerobic multiple-bed (UAMB) reactor

Aktivitas bakteri pereduksi sulfat dapat kita amati ditandai dengan adanya endapan hitam (besi sulfida). Reaktor UAMB terbuat dari plexiglass yang terdiri dari dua bagian: fluidized bed dan fixed bed. Pada bagian bawah reaktor di lapiasi dengan baller ring yang terbuat dari PVC non-porous dan bagian atas reaktor diisi dengan packing particles yang terbuat dari keramik. Reaktor ini dilengkapi dengan total tujuh port untuk sampling disepanjang reaktor secara vertikal. Thermostatically controlled heating element pada reaktor digunakan untuk menjaga temperatur reaktor.

h. Pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan *Passive Sulfate-Reducing Bioreaktor*

Percobaan skala laboratorium dengan mengidentifikasi sumber karbon sederhana dan kompleks sebagai donor elektron untuk pereduksi sulfat yang dapat menghilangkan kandungan logam cadmium (Cd) dan seng (Zn). Efisiensi dari *Passive Sulfate-Reducing Bioreaktor* bergantung terhadap jumlah konsentrasi logam dan sumber karbon, keberadaan bakteri pereduksi sulfat, suhu, serta waktu retensi hidrolis. Ketersediaan karbon sangat mempengaruhi pertumbuhan dan aktivitas bakteri. Jumlah karbon yang terdapat dalam air asam tambang biasanya sangat rendah (< 10 mg/L).

i. Pengelolaan Air Asam Tambang dengan menggunakan *Sodium Alginate Immobilized Sulfat Reducing Bacteria*

Pada metode ini bakteri pereduksi sulfat yang digunakan dipreparasi dalam bentuk immobilized SRB beads lalu dianalisis komposisi unsur dan morfologinya dengan menggunakan FESEM-EDX. Metode ini sangat menyarankan penggunaan bakteri pereduksi sulfat untuk melakukan remediasi media yang mengandung konsentrasi Zn awal yang tinggi mencapai 260 mg/L.

j. Pengelolaan Air Asam Tambang Dengan Menggunakan *the Presence of Zero Valent Iron*

Konsentrasi logam berat sangat mempengaruhi efektifitas bakteri dalam mereduksi sulfat dimana dengan adanya penambahan zero valent iron (ZVI) mengurangi toksisitas logam berat terhadap bakteri pereduksi sulfat. Bakteri pereduksi sulfat yang ditambahkan ZVI mampu mengurangi sulfat mencapai 81,4%. Kehadiran logam berat akan menonaktifkan enzim, mendenaturasi protein, dan bersaing dengan kation esensial, mengurangi aktivitas bakteri pereduksi sulfat dan memperpanjang waktu jeda system [11].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada jeda waktu untuk aktivitas kultur bakteri pereduksi sulfat pada sistem selama proses operasi 240 jam. Waktu jeda meningkat secara bertahap dengan meningkatnya konsentrasi logam berat, menunjukkan bahwa penghambatan aktivitas bakteri pereduksi sulfat oleh logam berat dapat terjadi dengan peningkatan konsentrasi logam berat terlarut. Kelebihan dan kekurangan metode dapat dilihat pada **TABEL 1.** dibawah ini:

TABEL 1. Kelebihan dan Kekurangan Metode

Referensi	Metode	Kelebihan	Kekurangan
[24]	Injeksi substrat kedalam subsurface	Konsisten dan reliable	Waktu retensi yang cukup lama
[4], [25]	Permeable reactive barriers	Meningkatkan biomassa dibandingkan metode yang lain	Berpotensi terjadinya pencemaran diakibatkan oleh metal presipitat
[9]	Infiltration beds	Second waste lebih mudah dikendalikan	Membutuhkan tekanan yang cukup tinggi
[17]	Anoxic Ponds	Tidak terjadi compacting sludge	Efektivitas rendah
[15]	wetland	Tidak membutuhkan pengawasan yang intens	Membutuhkan area yang cukup luas
[5],[6]	<i>Anaerobic Stirred Batch Reactor (ASBR)</i>	Tidak terjadinya penggumpalan	Membutuhkan energi yang cukup besar
[7], [8]	Up-flow anaerobic multiple-bed (UAMB) reaktor	Gaya geser yang cukup rendah	Volume input kecil
[12], [13], [18], [19], [20]	Passive Sulfate-Reducing Bioreaktor	Tidak terjadi compacting sludge	Rentan terjadi perubahan influent
[10]	<i>Sodium Alginate Immobilized Sulfat Reducing Bacteria</i>	Rating pengelolaan yang tinggi	Memerlukan effort yang besar dalam memodifikasi BPS
[1], [2], [11]	The Presence of Zero Valent Iron	Kemampuan untuk memulihkan logam berat tinggi	Terjadi jeda waktu dalam proses pengolahan

11.5 KESIMPULAN

Pengelolaan air asam tambang dengan menggunakan reaktor yang dimodifikasi dengan bantuan bakteri pereduksi sulfat lebih efektif dari pada menggunakan pengolahan pasif dikarenakan penghapusan sulfat yang dilakukan oleh bakteri pereduksi sulfat lebih optimal dibandingkan dengan metode pasif. Namun pemanfaatan reaktor membutuhkan biaya yang mahal dan maintenance yang lebih intens dibandingkan pengolahan pasif.

11.6 UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan paper ini melibatkan bantuan beberapa pihak khususnya kepada Prodi Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ayala-Parra, P., Sierra-Alvarez, R., & Field, J. A. 2016. Treatment of acid rock drainage using a sulfate-reducing bioreactor with zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 308, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.029>

- [2] Bai, H., Kang, Y., Quan, H., Han, Y., Sun, J., & Feng, Y. 2013. Treatment of acid mine drainage by sulfate reducing bacteria with iron in bench scale runs. *Bioresource Technology*, 128, 818–822. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.070>
- [3] Barton, L. L., & Fauque, G. D. 2009. Chapter 2 Biochemistry, Physiology and Biotechnology of Sulfate-Reducing Bacteria. In *Advances in Applied Microbiology* (1st ed., Vol. 68, Issue 09). Elsevier Inc. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(09\)01202-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(09)01202-7)
- [4] Benner, S. G., Blowes, D. W., Ptacek, C. J., & Mayer, K. U. 2002. Rates of sulfate reduction and metal sulfide precipitation in a permeable reactive barrier. *Applied Geochemistry*, 17(3), 301–320. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00084-1)
- [5] Bernat, K., Zielinska, M., Kulikowska, D., Cydzik-Kwiatkowska, A., & Wojnowska-Baryla, I. 2010. Effectiveness and kinetics of ammonium removal from anaerobic sludge digester supernatant. *Journal of Biotechnology*, 150, 252–252. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.09.130>
- [6] Christensen, B., Laake, M., & Lien, T. 1996. Treatment of acid mine water by sulfate-reducing bacteria. Results from a bench scale experiment. *Water Research*, 30(7), 1617–1624. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(96\)00049-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(96)00049-8)
- [7] Dvorak, D. H., Hedin, R. S., Edenborn, H. M., & McIntire, P. E. 1992. Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulfate reduction: Results from pilot-scale reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 40(5), 609–616. <https://doi.org/10.1002/bit.260400508>
- [8] Foucher, S., Battaglia-Brunet, F., Ignatiadis, I., & Morin, D. 2001. Treatment by sulfate-reducing bacteria of Chessy acid-mine drainage and metals recovery. *Chemical Engineering Science*, 56(4), 1639–1645. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00392-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00392-4)
- [9] Glombitza, F. 2001. Treatment of acid lignite mine flooding water by means of microbial sulfate reduction. *Waste Management*, 21(2), 197–203. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00061-1)
- [10] Gopi Kiran, M., Pakshirajan, K., & Das, G. 2018. Heavy metal removal from aqueous solution using sodium alginate immobilized sulfate reducing bacteria: Mechanism and process optimization. *Journal of Environmental Management*, 218, 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.020>
- [11] Guo, J., Kang, Y., & Feng, Y. 2017. Bioassessment of heavy metal toxicity and enhancement of heavy metal removal by sulfate-reducing bacteria in the presence of zero valent iron. *Journal of Environmental Management*, 203, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.075>
- [12] Hamai, Takaya, Takuya Koderu, Yuki Sato, Kousuke Takamoto, M. I., Kazunori Hatsuya, K. H., Tendo, H., Sunada, K., & Mikio Kobayashi, Masatoshi Sakoda, Takeshi Sakata, N. M. 2015. The Sequential Experiments of Passive Treatment System Using Bioreactor for Acid Mine Drainage in Japan. *International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference*, 1–9.
- [13] Hammack, R. W., Edenborn, H. M., & Dvorak, D. H. 1994. Treatment of water from an open-pit copper mine using biogenic sulfide and limestone: A feasibility study. *Water Research*, 28(11), 2321–2329. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90047-7)
- [14] Kaksonen, A. H., & Puhakka, J. A. 2007. Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals. *Engineering in Life Sciences*, 7(6), 541–564. <https://doi.org/10.1002/elsc.200720216>
- [15] Martins, M., Faleiro, M. L., Barros, R. J., Veríssimo, A. R., & Costa, M. C. 2009. Biological sulphate reduction using food industry wastes as carbon sources. *Biodegradation*, 20(4), 559–567. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9245-8>
- [16] Mayes, W. M., Davis, J., Silva, V., & Jarvis, A. P. 2011. Treatment of zinc-rich acid mine water in low residence time bioreactors incorporating waste shells and methanol dosing. *Journal of Hazardous Materials*, 193, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.073>
- [17] Nancucheo, I., & Johnson, D. B. 2012. Selective removal of transition metals from acidic mine waters by novel consortia of acidophilic sulfidogenic bacteria. *Microbial Biotechnology*, 5(1), 34–44. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2011.00285.x>
- [18] Neculita, C. M., Zagury, G. J., & Bussièrè, B. 2008. Effectiveness of sulfate-reducing passive bioreactors for treating highly contaminated acid mine drainage: II. Metal removal mechanisms and potential mobility. *Applied Geochemistry*, 23(12), 3545–3560. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.08.014>
- [19] Neto, E. S., Aguiar, A. B., Rodriguez, R. P., & Sancinetti, G. P. 2018. Acid Mine Drainage Treatment and Sulfate-Reducing Process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35(02), 543–552.
- [20] Nielsen, G., Coudert, L., Janin, A., Blais, J. F., & Mercier, G. 2019. Influence of Organic Carbon Sources on Metal Removal from Mine Impacted Water Using Sulfate-Reducing Bacteria Bioreactors in Cold Climates. *Mine Water and the Environment*, 38(1), 104–118. <https://doi.org/10.1007/s10230-018-00580-3>

- [21] Pagnanelli, F., Cruz Viggi, C., Cibati, A., Uccelletti, D., Toro, L., & Palleschi, C. 2012. Biotreatment of Cr(VI) contaminated waters by sulphate reducing bacteria fed with ethanol. *Journal of Hazardous Materials*, 199–200, 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.082>
- [22] Sahinkaya, E., Gunes, F. M., Ucar, D., & Kaksonen, A. H. 2011. Sulfidogenic fluidized bed treatment of real acid mine drainage water. *Bioresource Technology*, 102(2), 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.042>
- [23] Sheoran, V. A. S. Sheoran, P. P. 2010. Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3(2), 11–13.
- [24] Tsukamoto, T. K., & Miller, G. C. 1999. Methanol as a carbon source for microbiological treatment of acid mine drainage. *Water Research*, 33(6), 1365–1370. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00342-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00342-X)
- [25] Waybrant, K. R., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. 1998. Selection of reactive mixtures for use in permeable reactive walls for treatment of mine drainage. *Environmental Science and Technology*, 32(13), 1972–1979. <https://doi.org/10.1021/es9703335>
- [26] Zhao, Y., Ren, N., & Wang, A. 2008. Contributions of fermentative acidogenic bacteria and sulfate-reducing bacteria to lactate degradation and sulfate reduction. *Chemosphere*, 72(2), 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.046>