

## Upaya pengendalian pencemaran logam merkuri terhadap kegiatan pertambangan emas skala kecil : *systematic review*

Lalu Riza Mahendra<sup>1</sup>, Tri Wahyuni Sukesi<sup>1</sup>, Surahma Asti Mulasari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Magister Kesehatan Masyarakat, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia.

Correspondent Author: Lalu Riza Mahendra (email: [riza.mahendra245@gmail.com](mailto:riza.mahendra245@gmail.com))

### ABSTRACT

*Mercury waste pollution is an environmental health issue resulting from poor management of mineral production waste materials. Small-scale gold mining areas using amalgamation techniques still contribute high levels of mercury waste to the environment. The technical issue of inadequate storage of production waste materials warrants adaptive control studies for small-scale gold miners (PESK). The aim of this research is to determine the efficiency of chemical and biological mercury waste control in small-scale gold mining cases. This research is a literature review using the systematic review method. The obtained articles underwent review, analysis, and comparison of the systematic capabilities of chemical and biological control. The results of this research found 11 relevant study articles published between 2017-2024. Chemical and biological control methods are capable of reducing mercury levels in tailing water by up to 99%. The form of adaptive control for small-scale gold mining conditions is assessed pragmatically and based on reduced mercury levels. The conclusion of this research is that applied research on mercury waste pollution cases in small-scale mining is still relatively lacking. Efficiency in controlling mercury levels is more realistic using biological control. Laboratory test result approaches can indicate the potential of biological control with bioremediation techniques as an efficient adaptive control effort for small-scale gold miners.*

### Article History

Received 2024-07-25

Revised 2024-12-09

Accepted 2025-01-30

### Keywords

Artisanal Gold Mining

Mercury waste

Bioremediation

Filtration

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



### Pendahuluan

Kegiatan Penambang Emas Skala Kecil (PESK) adalah aktivitas menambang skala kecil yang berpotensi mencemari lingkungan dan menyebabkan masalah kesehatan. Pelaku Penambang emas skala kecil tergolong berasal dari masyarakat lokal yang tidak mempunyai IUP (Izin Usaha Pertambangan) di sekitar lokasi pertambangan. Mereka menggunakan cara amalgamasi dengan larutan merkuri anorganik (iHg) dan organik (MeHg) untuk memurnikan emas galian[1]. Teknik penambangan secara amalgamasi diatur oleh pemerintah melalui peraturan menteri negeri lingkungan hidup nomor 23 tahun 2008 pasal 5; ayat (5) dan pasal 6; ayat (4-5), yang telah membatasi penggunaan merkuri dan mewajibkan sistem retort[2]. Walaupun penggunaan larutan merkuri dalam penambangan telah dibatasi oleh pemerintah, saat ini masih ditemukan penambang liar yang menggunakan merkuri karena pertimbangan mudah di dapat, praktis, dan ekonomis. Upaya penanggulangan pencemaran logam merkuri di lingkungan digunakan sebagai bentuk tindakan pengendalian agen epidemiologi penyakit.

Metil merkuri ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) merupakan bentuk larutan merkuri organik yang sering digunakan dalam proses amalgamasi dan termasuk kedalam jenis larutan merkuri yang paling berbahaya[3]. WHO (World Health Organization) mengatur batas kandungan kadar merkuri dalam tubuh manusia maksimal sebesar  $1(\mu\text{g}/\text{L})$ [4]. Bioakumulasi merkuri dalam tubuh manusia dapat ditemukan karena paparan melalui jalur pernapasan (inhalasi), pencernaan (ingesti), dan kontak kulit. Intoksikasi merkuri yang tinggi dalam tubuh manusia dapat

menyebabkan kelainan neuropsikologis dan disfungsi organ pada tingkat akut maupun kronis[5].

Material buangan (waste) yang terkandung zat merkuri hasil pengolahan emas secara amalgam dapat menghasilkan tiga massa jenis[6]. Massa jenis uap merkuri dihasilkan dari proses pemanasan dalam retort, sedangkan massa jenis cair dan padat merkuri ditemukan dalam tailing dalam bentuk lumpur (sludge). Tailing merupakan lubang buangan yang menjadi faktor utama pencemaran lingkungan pada proses pertambangan emas. Peraturan Pemerintah RI No 101 tahun 2014 mengatur baku mutu limbah merkuri di tailing sebesar 0,3 ppm, namun pada pelaku penambang skala kecil tidak memperhatikan batas kadar yang boleh dikembalikan ke lingkungan[7]. Pengendalian tailing dengan kadar merkuri di atas ambang baku mutu dapat dilakukan melalui AMDAL dengan teknis biologis maupun kimiawi.

Penemuan kadar merkuri yang ditemukan di penambang emas skala kecil (PESK) memiliki jenis senyawa yang berbeda-beda. Berdasarkan studi toksikologi, *in vitro*, *in vivo*, dan epidemiologi merkuri dapat mempengaruhi tingkat toksisitasnya tergantung bahan merkuri yang digunakan dan jenis senyawa yang terbentuk[8]. Pengendalian limbah merkuri secara biologis salah satunya adalah teknik bioremediasi dengan metode fitoremediasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi[9]. Secara kimiawi penambahan zat adsorben pada tailing dapat mengendapkan merkuri melalui reaksi pengendapan (presipitasi)[10]. Berdasarkan efektivitas penurunan kadar merkuri dari berbagai studi, melalui studi *systematic* ini dapat digunakan sebagai acuan penggunaan jenis pengendalian merkuri tergantung dari sifat dan bentuk bahan merkuri yang digunakan. Sehingga tujuan penulisan artikel ini untuk mengetahui kelayakan penggunaan metode pengendalian limbah merkuri pada masing-masing jenis merkuri yang ditemukan dari penambang emas skala kecil (PESK).

## Metode

Metode yang digunakan penelitian ini adalah studi *systematic review*, yakni pendekatan yang dilakukan melalui studi kepustakaan dengan mencari informasi yang sesuai. Penelusuran informasi dilakukan melalui internet, dengan menggunakan Google. Referensi yang diperoleh berupa e-jurnal atau e-book baik dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris. Strategi pencarian jurnal dilakukan melalui Google Scholar, PubMed, dan Proquest dengan kata kunci tambang emas skala kecil, merkuri, analisis risiko kesehatan lingkungan, pencemaran limbah logam berat.

Kriteria inklusi penelitian ini menggunakan pencarian artikel dari tahun 2017-2024, sedangkan kriteria eksklusi hanya menggunakan artikel teknik pengendalian limbah merkuri pada kasus kegiatan pertambangan emas tanpa izin (PETI). Kriteria inklusi penelitian ini mengambil rentang artikel dalam waktu 8 tahun terakhir dikarenakan konsep pengendalian limbah terus mengalami perkembangan yang semakin efektif. Adapun kriteria eksklusi ditentukan karena aplikasi teknik pengendalian limbah masih sangat minim pada skala penambang kecil dan ilegal. Pencarian artikel menggunakan kata kunci artisanal gold miner, mercury, dan waste. Melalui hasil pencarian di PubMed didapatkan sebanyak 26 artikel yang berpotensi menjadi bahan data analisis. Sedangkan pencarian artikel di google scholar mendapatkan 409 artikel dengan teks pencarian "pengendalian pencemaran limbah merkuri pada tambang ilegal".

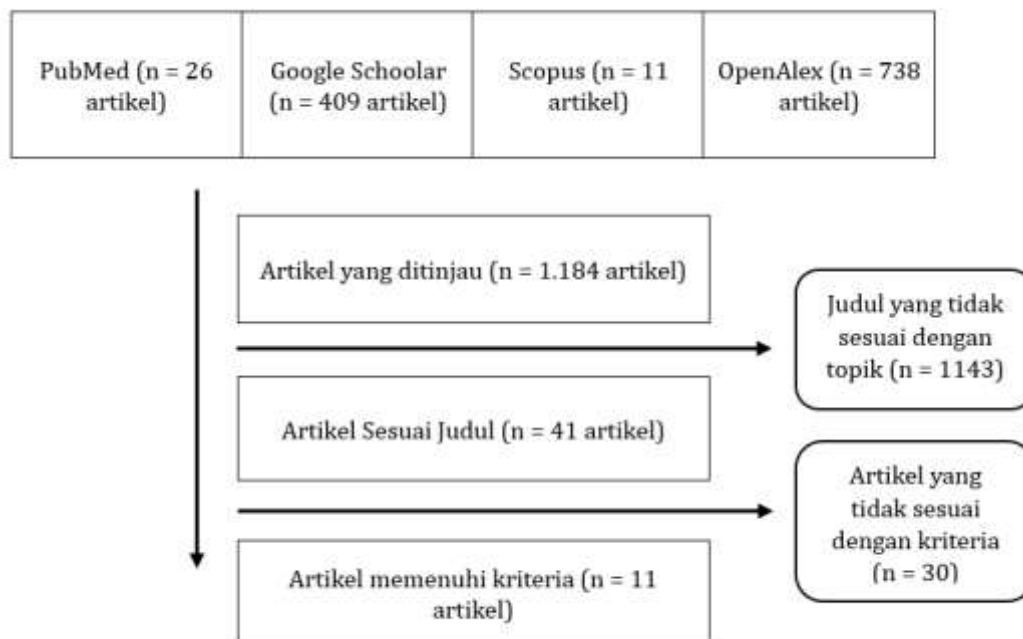
Peneliti menggunakan perbandingan aspek pengendalian secara fisik, kimia dan biologi. Setelah dilakukan penyaringan artikel yang sesuai, artikel kembali dikelompokkan menjadi dua jenis pengendalian, yaitu secara kimia fisik dan biologi. Alasan peneliti menggabungkan aspek kimia dan fisik karena keduanya saling berkaitan satu sama lain dalam teknik pengaplikasian penurunan logam berat merkuri.

Pertanyaan penelitian :apakah ditemukan perbedaan pengaruh efektifitas antara metode kimia fisik dan biologi sebagai teknik pengendalian pencemaran limbah merkuri di kawasan kegiatan pertambangan emas tanpa izin.

## Hasil dan Pembahasan

### Studi Literature

Penelitian ini berdasarkan pada artikel yang mengkaji kegiatan penelitian pengendalian limbah merkuri secara kimia fisik dengan teknik filtrasi (pengendapan logam berat), dan secara biologi dengan teknik bioremediasi pada periode 2019 –2024. Maka diambil kesimpulan dari hasil pencarian digunakan 3 artikel secara kimia fisik dan 8 artikel secara biologi (11 jurnal).



Gambar 1. Metode Prisma

Tabel 1. Pengendalian secara kimia fisik teknik filtrasi

Penulis	Judul Artikel	Hasil Temuan
Alfiansyah Umasugi, Erwin. B. Pattykayhattu, M. Said Karyani, Amin Jakfar (2023)[11]	Penggunaan Saringan Sebagai Alat Untuk Membantu Mengurangi Kadar Merkuri Yang Tercemar Di Desa Debowae Kecamatan Waelata Kabupaten Buru Provinsi Maluku	Untuk mengatasi kerusakan lingkungan akibat merkuri, dapat menggunakan Arang kayu putih ( <i>Melaleuca Leucadendra</i> ) yang dapat menurunkan konsentrasi kadar merkuri (Hg) namun harus memperhatikan pola penyaringan yang tepat atau pemilihan filtrasi penyaringan yang sesuai dan juga pemilihan ukuran pipa yang sesuai dengan jumlah arang kayu putih yang ada.
Wahyu Idi Pangestu, Zaida Syafira Putri Pralano dan, Ratna Dian Anggraeni (2020)[12]	Efektivitas Pengaplkasian Zeolit Dengan Menggunakan Metode <i>Tyler Sieve Astm</i> , Up Flow, Dan Catu Dalam Upaya Penurunan Kadar Merkuri Pada Limbah Pertambangan Emas Rakyat	Dari studi yang dilakukan terhadap 3 (tiga) metode zeolit terbukti mampu mengurangi kandungan merkuri rata rata 99,2342 % dengan ukuran optimal penggunaan zeolit 20 – 200 mesh. Metode <i>up flow</i> dengan campuran zeolit dan karbon aktif mampu menurunkan kadar merkuri sesuai dengan ambang batas baku mutu lingkungan.
Gary Schudel, Robert Kaplan, Rebecca	<i>Mercury isotopic signatures of tailings</i>	Berdasarkan hasil penelitian ini, sampel mercury ASGM ( <i>Artisanal and small-scale</i>

Penulis	Judul Artikel	Hasil Temuan
Adler Miserendino (2019)[13]	<i>from artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in southwestern Ecuador</i>	dari Portovelo-Zaruma (Ecuador), yang mewakili berbagai tahap pengolahan bijih emas bergrade rendah, dianalisis untuk konsentrasi Hg dan rasio isotop stabil. Secara keseluruhan, komposisi isotop Hg dari endmember potensial ASGM berbeda dengan komposisi tipikal yang diamati dalam ekosistem air tawar (misalnya, dari erosi tanah, deposisi atmosfer), memungkinkan isotop Hg menjadi alat yang kuat dalam melacak kontaminasi Hg hilir dari ASGM.

Metode filtrasi kimia fisik digunakan secara luas dalam mengendalikan limbah logam merkuri di penambangan ilegal. Proses ini melibatkan penggunaan bahan kimia dan teknik filtrasi untuk mengurangi konsentrasi merkuri dalam limbah. Pertama, limbah dari penambangan diproses melalui serangkaian langkah kimia untuk mengendapkan merkuri dari larutan. Kemudian, filtrasi fisik dilakukan untuk memisahkan partikel-partikel merkuri yang telah diendapkan dari larutan. Hasil akhirnya adalah limbah yang lebih aman untuk dibuang ke lingkungan. Metode ini memainkan peran penting dalam meminimalkan dampak limbah logam merkuri terhadap lingkungan dan kesehatan manusia yang disebabkan oleh penambangan ilegal[14]

**Tabel 2.** Pengendalian secara biologi teknik bioremediasi

Penulis	Judul Artikel	Hasil Temuan
Fauzi Deswandri dan Fadhillah (2019)[15]	Variasi Waktu Terhadap Penyerapan Merkuri (Hg) Oleh Eceng Gondok ( <i>Eichhornia Crassipes</i> ) (Studi Kasus: Air Danau Bekas PETI Di Jorong Jujutan, Nagari Lubuk Gadang, Kecamatan Sangir, Kabupaten Solok Selatan.	Berdasarkan hasil penelitian didapatkan kesimpulan bahwa teknik bioremediasi dari Satu gram Eceng Gondok mampu menyerap Hg sebanyak $2,15 \times 10^{-5}$ mg/L dalam waktu 3 hari.
Reginawanti Hindersah, Gina Nurhabibah, Dan Rachmat Harryanto (2021)[16]	Inokulasi <i>Azotobacter</i> Dan Aplikasi Kompos Untuk Bioremediasi Tailing Terkontaminasi Merkuri	Hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi <i>Azotobacter</i> meningkatkan tinggi dan bobot kering tanaman jagung umur 3 minggu. Aplikasi kompos kotoran sapi 30 g/polibeg disertai inokulasi <i>A. chroococcum</i> maupun konsorsium <i>Azotobacter</i> menurunkan kadar Hg tanah dan meningkatkan serapan Hg di tanaman.
Koesma Nurina Ghassani dan Harmin Sulistiyaning Titah (2022)[17]	Kajian Fitoremediasi untuk Rehabilitasi Lahan Pertanian Akibat Tercemar Limbah Industri Pertambangan Emas	berdasarkan hasil penelitian didapatkan persentase efisiensi tumbuhan Kacang Kalopo ( <i>Calopogonium mucunoides</i> ) dan Rumput Gajah Kate ( <i>Pennisetum purpureum CV. Mott</i> ) pada pelarutan Merkuri (Hg) adalah sebesar 66,67%.
Dwi Retno Rahayu dan Sarwoko	Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan	Hasil studi kasus pencemaran merkuri di wilayah sungai Krueng Sabee, Kabupaten

Penulis	Judul Artikel	Hasil Temuan
Mangkoedihardjo (2022)[18]	Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya)	Aceh Jaya menyatakan bahwa metode bioaugmentasi dengan teknik <i>in-situ</i> dan adanya penambahan nutrisi merupakan alternatif yang sesuai untuk menurunkan konsentrasi merkuri di sedimen sungai. <i>Konsorsium</i> yang terpilih adalah bakteri <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , dan <i>Citrobacter freundii</i> dengan persentase degradasi merkuri sebesar 99% dapat mengurangi pencemar dimana konsentrasi awal adalah 0,76 mg/kg menjadi 0,0076 mg/kg dan sesuai dengan baku mutu untuk sedimen (0,18 mg/kg).
Beny Kurniawan, Duryat, Melya Riniarti, Slamet Budi Yuwono (2019)[19]	Kemampuan Adaptasi Tanaman Mahoni ( <i>Swietenia macrophylla</i> ) terhadap Cemaran Merkuri pada Tailing Penambangan Emas Skala Kecil	Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman mahoni memiliki kemampuan adaptasi pada media dengan konsentrasi tailing maksimal sebesar 75%. Semakin tinggi konsentrasi tailing pada media tanam akan cenderung menurunkan persentase hidup, pertambahan diameter, pertambahan jumlah daun, luas daun, pertambahan panjang akar, dan biomassa tanaman mahoni.
Liswara Neneng, Nawan, dan Asri Adelia (2023)[20]	Pengaruh Tahapan Bioremediasi Terhadap Efektivitas Eliminasi Merkuri (Hg) Di Media Cair	Tahapan bioremediasi yang paling efektif untuk eliminasi merkuri (Hg) di media cair adalah tahapan T3 yang dimulai dari Limbah Merkuri → Mikroalga → Bakteri → Lempung Merah → Arang Aktif, dengan nilai efektivitas penurunan merkuri sebesar 89,4%.
Dhimas Mahadhika Putra, Andi Sungkowo, dan Eni Muryani (2019)[21]	Arahan Teknis Pengolahan Limbah Hasil Proses Amalgamasi untuk Menurunkan Kadar Merkuri di Desa Cihonje, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah	Fitoremediasi dengan sistem batch memiliki nilai efektifitas untuk kandungan TSS tanaman eceng gondok sebesar 99,646 % dan merkuri 99,714 %. Sedangkan tanaman kangkung memiliki nilai efektifitas untuk kandungan TSS sebesar 99,758 % dan merkuri 99,783 % selama 18 hari.
Mahya Ihsan, Freddy Ilfan, Zuli Rodhiyah (2020)[22]	Potensi Tanaman Lokal Sebagai Agen Bioremediasi Merkuri (Hg) Pada Lahan Bekas Tambang Emas Di Sarolangun, Jambi	Merkuri dalam tubuh tumbuhan terakumulasi banyak pada akar tumbuhan dengan kisaran 0,089- 0,421 mg/Kg. Rumput <i>Phragmites sp</i> merupakan tumbuhan yang dominan tumbuh pada daerah tersebut, berdasarkan hasil analisis nilai BAC, TF, dan BCF tanaman tersebut juga memiliki potensi untuk dijadikan agen bioremediasi dibanding dengan tanaman yang lain. Tumbuhan yang direkomendasikan sebagai agen fitoremediasi berdasarkan dominasinya

Penulis	Judul Artikel	Hasil Temuan
		pada lingkungan dalam penelitian ini adalah jenis <i>Phragmites sp.</i> , <i>Melastoma sp.</i> dan <i>Imperata cylindrica</i> .

Metode bioremediasi menjadi solusi yang menjanjikan dalam mengendalikan limbah logam merkuri di penambangan ilegal. Proses ini melibatkan penggunaan mikroorganisme atau tanaman tertentu untuk mengubah atau mengurangi toksisitas merkuri dalam limbah[23]. Mikroorganisme seperti bakteri atau fungi dapat menguraikan merkuri menjadi bentuk yang lebih aman atau menangkapnya dari lingkungan. Selain itu, tanaman seperti tanaman hiperakumulator mampu menyerap dan mengakumulasi merkuri dari tanah dan air. Dengan mengadopsi pendekatan ini, limbah logam merkuri dapat diolah secara efektif tanpa menyebabkan dampak negatif yang lebih lanjut pada lingkungan dan kesehatan manusia.

#### ***Kekurangan Penggunaan Metode Kimia Fisik Terhadap Penambang Emas Skala Kecil***

Penggunaan terapan kimia fisik dengan metode filtrasi pada limbah merkuri penambang emas skala kecil masih terbilang minim. Hal ini dikarenakan pengelolaannya membutuhkan sistem manajemen yang terpadu. Penambang emas skala kecil diketahui masih menepikan kondisi efek samping pencemaran limbah merkuri, sehingga pada pengelolaan limbah tidak dapat digunakan sistem mekanis yang terbilang lengkap seperti pengelolaan penambang skala masif[24].

Permasalahan seperti Umasugi (2023), diketahui dengan menggunakan teknik menyaring kandungan merkuri dapat menurunkan kadar merkuri. Namun permasalahannya masih harus mencermati penggunaan mekanisme alat seperti pipa dan ukuran arang aktif dari kayu putih. Kadar merkuri yang mampu terikat sebesar 0,0018 µg/L atau 52,94%. Penggunaan zeolit atau arang aktif juga sejalan dengan penelitian Pangestu (2020) dengan tingkat reduksi yang hampir mirip.

Penggunaan zeolit dengan ukuran optimal dari 20-200 mesh dapat mengurangi kandungan merkuri hingga 99,2342%. Penggunaan zeolit dan karbon aktif dapat maksimal dengan estimasi perhitungan setiap 40 liter limbah ditambahkan 8L zeolit dan 8L karbon aktif setiap harinya. Sehingga penambang emas skala kecil membutuhkan biaya tambahan untuk pengendalian limbah merkuri sebesar Rp. 2.000.000 – 5.000.000 per tahun.

Schudel (2019) meneliti tentang isotop penambang emas skala kecil yang berada di Ekuador memiliki kesamaan konsentrasi batas baku mutu di lingkungan. Tinjauan data isotop Hg dari literatur mengungkapkan bahwa ciri-ciri isotop bahan PESK, sebagian besar, tidak tumpang tindih. secara signifikan dengan tanda-tanda latar belakang Hg di tanah dan sedimen atau limpasan terestrial. Perbedaan ini wajar mengingat Hg dalam bahan PESK berasal dari sumber biogenik (yaitu unsur Hg) dan Hg pada tanah latar, sedimen, dan limpasan terestrial sebagian besar berasal dari kombinasi pengendapan kering dan basah.

Penelusuran metode yang tepat untuk pengendalian merkuri yang disebabkan PESK perlu keterlibatan pengendalian non-teknis. Kebijakan pemerintah yang belum jelas serta kondisi hak legalitas perlu dipertimbangkan. Mengingat penambang emas skala kecil memberikan kontribusi pertumbuhan ekonomi, reklamasi tailing PESK perlu legitimasi resmi dari pemerintah tentang kesehatan lingkungan[25]. Dampak kualitas lingkungan penambang emas dapat menimbulkan masalah kesehatan apabila pengelolaan lingkungan tercemar bahan limbah B3[26].

#### ***Kelebihan Penerapan Metode Biologi pada Penambang Emas Skala Kecil***

Pada potensi pengendalian limbah merkuri menggunakan secara biologis dengan metode bioremediasi, potensi yang diberikan untuk menurunkan kadar merkuri sangat pragmatis. Kajian jenis tanaman seperti eceng gondok mampu menyerap kadar merkuri. Disamping penggunaan metode bioremediasi yang tergolong mudah, efikasi untuk menyerap kadar merkuri mampu hingga 99%. Pengaruh penurunan kadar merkuri dapat lebih efisien jika ditambahkan bakteri *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Citrobacter freundii*

karena diketahui kemampuannya dalam mereduksi kadar merkuri[27]. Potensi bakteri sebagai zat mikroorganisme bertindak dalam resisten merkuri melalui detoksifikasi  $Hg^{2+}$  menjadi  $Hg^0$  [28], [29].

Efek samping dari penggunaan tanaman sebagai transeptor merkuri di lingkungan yaitu menghambat laju tumbuh tanaman. Pengujian menggunakan bioreactor mengindikasikan kemampuan bakteri dapat maksimal jika dipadukan dengan mikroalga, lempung merah, dan arang aktif. Namun tahapan-tahapan teknis penelitian Neneng (2023) masih belum memungkinkan untuk dapat diaplikasikan pada lingkungan area PESK [30].

Maka dari beberapa penelitian yang telah disajikan, penulis menyimpulkan bahwa penggunaan metode bioremediasi secara biologis lebih sesuai untuk penambang emas skala kecil. Efisiensi penurunan kadar merkuri mampu diatasi mengingat kadar merkuri yang terdeteksi tidak lebih besar dari hasil limbah tambang tailing skala industri. Penerapan secara biologis dapat meminimalisir kandungan toksin hasil reaksi dari penambahan penggunaan campuran kimia lainnya. Sehingga tujuan untuk efisiensi pengendalian limbah merkuri di penambang emas skala kecil dapat menggunakan teknik pengendalian biologis secara bioremediasi dengan media tanaman beragam.

## Kesimpulan

Berdasarkan systematic review penelitian pengendalian limbah merkuri oleh penambang emas skala kecil, dapat disimpulkan bahwa pengendalian yang efektif yaitu menggunakan pengendalian secara biologis dengan metode teknik bioremediasi. Kelebihan metode bioremediasi dibandingkan dengan teknik filtrasi adalah sifat pragmatis dan efek jangka panjang kesediaan vegetasi alami.

## Referensi

- [1] M. Bagia, O. Setiani, and M. Rahardjo, "Dampak Paparan Merkuri Terhadap Gangguan Kesehatan Penambang Emas Skala Kecil: Systematic Review," *Poltekita Jurnal Ilmu Kesehatan*, vol. 16, no. 3, pp. 392–401, 2022, doi: 10.33860/jik.v16i3.1238.
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup, "Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 23 Tahun 2008 Tentang Pedoman Teknis Pencegahan Pencemaran Dan/Atau Kerusakan Lingkungan Hidup Akibat Pertambangan Emas Rakyat," *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., vol. 7, no. Desember, pp. 1–25, 2008.
- [3] R. Pamphlett and S. Kum Jew, "Inorganic mercury in human astrocytes, oligodendrocytes, corticomotoneurons and the locus ceruleus: implications for multiple sclerosis, neurodegenerative disorders and gliomas," *BioMetals*, vol. 31, no. 5, pp. 807–819, 2018, doi: 10.1007/s10534-018-0124-4.
- [4] Iwan, "Hubungan Pertambangan Emas Dengan Kadarmerkuri Dalam Rambut Penambang Di Desa Kedaro Sekotong Lombok Barat," *Jurnal Sangkareang Mataram*, vol. 4, no. 1, pp. 56–59, 2018.
- [5] E. Sumarjono, "Kompleksitas Permasalahan Merkuri Dalam Pengolahan Bijih Emas Berdasarkan Perspektif Teknis Lingkungan Manusia Dan Masa Depan," *Kurvatek*, vol. 5, no. 1, pp. 113–122, 2020, doi: 10.33579/krvtk.v5i1.1833.
- [6] T. M. Palapa and alfonds andrew Maramis, "Kandungan Logam dalam Air dan Sedimen Tailing Amalgamasi Tambang Emas Talawaan," *Malang. Univ. Negeri Malang*, 2014.
- [7] Menteri Kesehatan RI, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Tentang Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun," 2014, [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/15440%0Apapers://ae99785b-2213-416d-aa7e-3a12880cc9b9/Paper/p18311>
- [8] V. L. Cariccio, A. Samà, P. Bramanti, and E. Mazzon, "Mercury Involvement in Neuronal Damage and in Neurodegenerative Diseases," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 187, no. 2, pp.

- 341–356, 2019, doi: 10.1007/s12011-018-1380-4.
- [9] E. R. S. Dewi et al., “Teknik Bioremediasi Sekaligus Sebagai Solusi Dalam Upaya Pengendalian Pencemaran Lingkungan : Literatur Review,” *Jurnal Sosial dan Bisnis*, vol. 2, no. 1, pp. 125–126, 2024, [Online]. Available: <https://humanisa.my.id/index.php/hms/article/view/89/133>
- [10] S. Hadi et al., “Characteristics, stability, and utilization of sulfuric natural water from Sebau East Lombok in reducing dissolved metals,” *Jurnal Degraded Mining Lands Management*, vol. 10, no. 3, pp. 4559–4566, 2023, doi: 10.15243/jdmlm.2023.103.4559.
- [11] A. J. Alfiansyah Umasugi, Erwin. B. Pattykayhattu, M. Said Karyani, “Penggunaan Saringan Sebagai Alat Untuk Membantu Mengurangi Kadar Merkuri Yang Tercemar Di Desa Debowae Kecamatan Waelata Kabupaten Buru Provinsi Maluku,” *Jurnal Mech. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 186–194, 2023.
- [12] W. I. Pangestu, Z. S. P. Pralano, and R. D. Anggraeni, “Efektivitas Pengaplikasian Zeolite Dengan Menggunakan Metode Tyler Sieve ASTM, Up Flow, Dan Catu Dalam Upaya Penurunan Kadar Merkuri Pada Limbah Pertambangan Emas Rakyat,” *Jurnal Bina Tambang*, vol. 3, pp. 201–208, 2020.
- [13] G. Schudel et al., “Mercury isotopic signatures of tailings from artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in southwestern Ecuador,” *Sci. Total Environ.*, vol. 686, no. December 2021, pp. 301–310, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.004.
- [14] D. Y. Suryanti, T., Ambarwati, D. A., Udyani, K., & Purwaningsih, “Penurunan Kadar Tss Dan Cod Pada Limbah Cair Industri Batik Dengan Metode Gabungan Koagulasi Dan Adsorpsi. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*,” vol. (Vol. 1, N, 2019.
- [15] F. Deswandri and Fadhillah, “Variasi Waktu Terhadap Penyerapan Merkuri (Hg) Oleh Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) (Studikasis: Air Danau Bekas,” *Jurnal Bina Tambang*, vol. 4, no. 4, pp. 1–11, 2018.
- [16] R. Hindersah, G. Nurhabibah, and R. Harryanto, “Inokulasi Azotobacter dan aplikasi kompos untuk bioremediasi tailing terkontaminasi merkuri,” *Jurnal Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 17, no. 1, pp. 39–46, 2021, doi: 10.30556/jtmb.vol17.no1.2021.1142.
- [17] K. N. Ghassani and H. S. Titah, “Kajian Fitoremediasi untuk Rehabilitasi Lahan Pertanian Akibat Tercemar Limbah Industri Pertambangan Emas,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 1, 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i1.82682.
- [18] D. R. Rahayu and S. Mangkoedihardjo, “Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 1, pp. 15–22, 2022.
- [19] B. Kurniawan, M. Riniarti, and S. Budi Yuwono, “Kemampuan Adaptasi Tanaman Mahoni (*Swietenia macrophylla*) terhadap Cemar Merkuri pada Tailing Penambangan Emas Skala Kecil,” *Jurnal Sylva Lestari*, vol. 7, no. 3, pp. 359–369, 2019.
- [20] A. Adelia, L. Neneng, and Nawan, “Pengaruh Tahapan Bioremediasi Terhadap Efektivitas Eliminasi Merkuri (Hg) Di Media Cair,” *Jurnal Ilm. Kanderang Tingang*, vol. 14, no. 1, pp. 70–79, 2023, doi: 10.37304/jikt.v14i1.199.
- [21] D. M. Putra, A. Sungkowo, and E. Muryani, “Arahan Teknis Pengolahan Limbah Hasil Proses Amalgamasi untuk Menurunkan Kadar Merkuri di Desa Cihonje, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah,” *Jurnal Ilm. Lingkung. Kebumian*, vol. 2, no. 1, p. 13, 2020, doi: 10.31315/jilk.v2i1.3286.
- [22] M. Ihsan, F. Ilfan, and Z. Rodhiyah, “Potensi Tanaman Lokal Sebagai Agen Bioremediasi Merkuri (Hg) Pada Lahan Bekas Tambang Emas Di Sarolangun, Jambi,” *Dampak*, vol. 18, no. 1, p. 11, 2021, doi: 10.25077/dampak.18.1.11-16.2021.
- [23] N. D. Pamungkas, A. Firmansyah, and S. N. Ethica, “Isolasi dan Uji Patogenitas Bakteri



- Indigen Penghasil Enzim Selulase dari Limbah Ampas Kelapa di Pasar Tradisional Ngawen untuk Bioremediasi,” Pros. Semin. Nas. Mhs. Unimus, vol. 1, pp. 261–267, 2018,
- [24] I. M. Sadiana, “Aktivasi dan Karakteristik Lempung Alam Asal Kalimantan Tengah sebagai Salah Satu Alternatif Bahan Adsorben,” Semin. Nas. Pendidik. Banjarmasin, 2016.
- [25] A. Muadifah, *Pengendalian Pencemaran Lingkungan*. Malang: MNC Publishing, 2019.
- [26] E. V. I. P. Tambani, A. Purwanto, and E. J. R. Kawung, “Dampak Pertambangan Emas Terhadap Perilaku Kesehatan Perempuan Di Area PESK Di Kecamatan Dimembe,” *J. Ilm. Soc.*, vol. 3, pp. 1–6, 2023.
- [27] M. S. Silitonga, S. Nedi, and Z. Zulkifli, “Ratio of Elements Carbon (C), Nitrogen (N), and Phosphorus (P) At Sediment in Seagrass Ecosystem Nirwana Beach Padang West Sumatera,” *Jurnal Coast. Ocean Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 170–176, 2021, doi: 10.31258/jocos.2.3.170-176.
- [28] M. Abdullah, “Isolasi Dan Identifikasi Bakteri Pendegradasi Merkuri (Hg) Di Sungai Waeapo Kabupaten Buru,” *Iain Ambon*., p. 2018, 2018.
- [29] H. R. Dash, M. Sahu, B. Mallick, and S. Das, “Functional efficiency of MerA protein among diverse mercury resistant bacteria for efficient use in bioremediation of inorganic mercury,” *Biochimie*, vol. 142, pp. 207–215, 2017, doi: 10.1016/j.biochi.2017.09.016.
- [30] N. H. Pakharuddin, M. N. Fazly, S. H. Ahmad Sukari, K. Tho, and W. F. H. Zamri, “Water treatment process using conventional and advanced methods: A comparative study of Malaysia and selected countries,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 880, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/880/1/012017.