

Potensi isolat bakteri dari tailing pertambangan emas asal Kampung Warmanen Distrik Sausapor Kabupaten Tambrau sebagai agen bioleaching tembaga (Cu)

The potential of bacterial isolates from gold mining tailings from Warmanen Village, Sausapor District, Tambrau Regency as copper (Cu) bioleaching agents

Sevian Arvilein Maahury¹⁾, Maria Massora^{1*)}, Rina Anita Moge¹⁾, Hermawati Abubakar²⁾

¹⁾Program Studi Magister Biologi Universitas Papua

²⁾Program Studi S1 Biologi FMIPA Universitas Papua, Jl. Gunung Salju, Amban, Manokwari, Papua Barat

Email: m.massora@unipa.ac.id

Disubmit: 6 Desember 2025, direvisi: 9 Januari 2026, diterima: 31 Januari 2026

Doi : 10.30862/cassowary.cs.v9.1.513

ABSTRACT: Gold mining in Village Warmanen, Sausapor District, Tambrau Regency, has led to environmental pollution by heavy metals, one of which is copper (Cu), which has the potential to damage soil ecosystems and inhibit agricultural productivity. This research aims to isolate indigenous bacteria from former gold mining soil in Warmanen, test their ability to reduce Cu concentration through bioleaching technology, and identify the most promising bacterial isolates. The research method included soil sampling from the contaminated location, isolation and purification of bacteria. The bioleaching capability test was conducted by incubating eight bacterial isolates with copper-containing soil samples for 21 days on a laboratory scale. The decrease in Cu concentration in pellet fractions was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The results showed that the bioleaching process using indigenous bacteria was effective in reducing Cu concentration, especially in the solid (pellet) fraction of the soil. The accumulation of 3 bacterial isolates showed the highest potential on the 7th day, namely PW 1, PW 3, and PW 8, the isolate with the highest Cu accumulation was PW 1 with an accumulation of 0.30%.

Keywords: Bioleaching, Copper (Cu), Indigenous Bacteria, Gold Mining.

PENDAHULUAN

Sektor pertambangan merupakan salah satu sektor yang mendominasi perekonomian daerah. Emas merupakan salah satu komoditas pertambangan yang banyak terdapat di Papua. Menurut Kulyasin (2024), Papua memiliki tambang emas terbesar di Indonesia dengan luas mencapai 229.893,75 ha yang tersebar di beberapa kabupaten, antara lain Pegunungan

Bintang, Keerom, Intan Jaya, Paniai, Timika, Nabire, dan wilayah lainnya. Namun, meningkatnya aktivitas pertambangan telah menimbulkan kerusakan lingkungan yang serius. Penggunaan bahan kimia seperti sianida dan merkuri dalam proses pemurnian emas menyebabkan degradasi lingkungan yang parah.

Kegiatan penambangan dan pengolahan emas menghasilkan limbah padat (tailing) yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah terlebih dahulu. Pengolahan limbah bertujuan untuk menurunkan kadar kontaminan bahkan menghilangkan bahan beracun sebelum dilepaskan ke lingkungan. Walaupun tata cara pembuangan limbah berbahaya telah diatur oleh Pemerintah melalui Kementerian Lingkungan Hidup, pada praktiknya masih banyak ditemukan pencemaran yang diakibatkan oleh limbah industri pertambangan (Nazmi, 2011).

Tailing penambangan emas biasanya mengandung mineral inert seperti kuarsa, kalsit, dan aluminosilikat, namun juga dapat mengandung logam berat berbahaya seperti tembaga (Cu), arsen (As), kadmium (Cd), timbal (Pb), merkuri (Hg), sianida (CN), dan lainnya. Logam berat tersebut tergolong limbah B3 dan dapat mencemari tanah, air, serta membahayakan organisme (Nazmi, 2011). Logam berat umum yang sering ditemukan antara lain Pb, Cr, Zn, Cd, Cu, Hg, Ni, dan As (Nguyen, 2021). Konsentrasi dan bentuk kimia logam berat menentukan tingkat toksisitasnya (Jaishankar et al., 2014). Tembaga merupakan salah satu logam beracun hasil samping pengolahan bijih logam yang menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan (Nuriadi, 2013).

Bioremediasi merupakan salah satu metode yang efektif dan ramah lingkungan untuk menurunkan kandungan polutan dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme (Suryani, 2011). Salah satu teknik bioremediasi adalah *bioleaching*, yaitu proses mobilisasi atau ekstraksi logam dari lingkungan menggunakan mikroba. *Bioleaching* dianggap lebih efektif dan ramah lingkungan dibandingkan metode kimia karena tidak menghasilkan limbah berbahaya dalam jumlah besar (Yang et al., 2018). Metode ini telah diterapkan pada skala industri untuk ekstraksi logam seperti tembaga, uranium, dan emas (Susilawati, 2015), serta menawarkan keuntungan seperti konsumsi energi rendah, biaya operasional murah, dan manajemen sederhana (Sarkodie et al., 2022).

Bakteri indigenous memiliki peran penting dalam proses *bioleaching* karena telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang tercemar sehingga memiliki toleransi tinggi terhadap logam berat (Massora et al., 2017). Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan potensi bakteri lokal sebagai agen bioremediasi, antara lain *Brucella intermedia* (Shazmin et al., 2023) dan *Achromobacter* sp. (Marzec-Grządziel & Gałazka, 2023), serta *Bacillus subtilis* yang dikenal mampu beradaptasi pada kondisi ekstrem (Kusdini et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi bakteri indigenous dari tailing penambangan emas Warmanen, Distrik Sausapor, Kabupaten Tambrauw yang berpotensi menurunkan konsentrasi logam berat tembaga (Cu) melalui proses *bioleaching*, serta mengidentifikasi isolat bakteri yang paling efektif sebagai kandidat agen bioremediasi.

MATERI DAN METODE

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, timbangan analitik, gelas ukur, gelas beaker, hotplate (Galaxy 400), erlenmeyer, cawan petri, tabung reaksi, LAF (*Laminar Air Flow*), bunsen, pinset, oven (Memmert D06058), inkubator (Memmert D06836), shaker inkubator (Ratek Instruments), mikropipet, tip, ose, aluminium foil, plastik wrap, labu ukur, pipet tetes, sentrifus, autoclave (GEA YX24LDC), AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*) (Shimadzu AA-7000), vortex.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, Tailing Warmanen, LB (*Luria Bertani*), NB (*Nutrient Broth*), NA (*Nutrient Agar*), NaOH, larutan fisiologis, larutan Aquaregia (1 HNO₃ : 3 HCL), Larutan induk Cu.

Pengambilan sampel tailing

Pengambilan sampel tailing dilakukan menggunakan metode purposive sampling. Sampel diambil pada tiga titik lokasi bekas penambangan, masing-masing sebanyak 100 gram, kemudian dicampurkan untuk membentuk sampel komposit. Sampel yang

telah dikomposit dimasukkan ke dalam botol steril dan diberi label. Selanjutnya, sampel dibawa ke laboratorium untuk dianalisis lebih lanjut.

Preparasi Sampel dan Isolasi Bakteri

Teknik isolasi diawali dengan pembuatan seri pengenceran sampel. Sampel ditimbang sebanyak 10 gram dan dimasukkan ke dalam Erlenmeyer yang berisi 90 ml larutan fisiologis. Kemudian di vorteks dan diperoleh pengenceran 10^{-1} . Lalu diambil sebanyak 1 ml dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang berisi larutan fisiologis sebanyak 9 ml sehingga diperoleh pengenceran 10^{-2} dilakukan hingga diperoleh pengenceran 10^{-3} . Isolasi bakteri menggunakan metode tuang. Pengenceran 10^{-2} dan 10^{-3} diambil masing-masing sebanyak 1 ml, dimasukkan ke dalam Cawan petri dan dituangkan medium NA, lalu diinkubasi pada suhu 37°C selama 24-48 jam. Isolat yang diperoleh kemudian dimurnikan.

Pemurnian Isolat Bakteri

Pemurnian dilakukan dengan mengambil koloni bakteri yang tumbuh terpisah dan memiliki perbedaan bentuk fisik (seperti warna, bentuk, tepi, dan permukaan). Koloni tersebut kemudian diinokulasikan ke media NA miring dan diinkubasi pada suhu 37°C selama 24-48 jam.

Kultur Stok Isolat Bakteri Uji

Bakteri yang telah tumbuh pada media NA diambil sebanyak satu ose lalu diinokulasikan pada media NB sebanyak 9 ml dan di vortex selama 1 menit selanjutnya diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam.

Ekstraksi Bakteri

Sebanyak 1 ml kultur isolat PW1 yang telah ditumbuhkan selama 24 jam diinokulasikan masing-masing ke dalam erlenmeyer yang berisi 100ml medium LB dan 1gr sampel tailing. Selanjutnya di inkubasi dan di shaker selama 7 hari dan 14 hari. Setelah inkubasi 7 hari, 14 hari dan 21 hari, kultur isolat di sentrifuge selama 10 menit dan didapatkan supernatan dan sel pelet. Selanjutnya supernatan dituang ke dalam wadah. Metode yang sama dilakukan terhadap

7 isolat lainnya (PW2, PW3, PW4, PW5, PW6, PW7, PW8). Pelet yang diperoleh kemudian di uji kandungan tembaga menggunakan AAS.

Analisa Kandungan Tembaga Pada Isolat Dan Tailing Dengan Metode AAS

Preparasi Isolat

Timbang sel pelet isolat PW 1 sebanyak 1gr kemudian dilarutkan dalam 5 ml larutan Aquaregia (1 HNO_3 : 3 HCL). Selanjutnya di destruksi atau pemanasan pada hotplate dalam lemari asam selama 30 menit atau sampai warna sampel berubah warna agak kemerahan, setelah itu dipindahkan ke dalam labu ukur 25 ml dan di tambahkan aquades sampai tanda batas, kemudian di homogenkan. Selanjutnya isolat PW 1 di saring menggunakan kertas saring, perlakuan yang sama dilakukan pada PW 2, PW 3, PW 4, PW 5, PW 6, PW 7, PW 8 dan Tailing. Setelah isolat disaring, Selanjutnya dilakukan pembuatan larutan standar dengan menggunakan Larutan baku Cu 1000 ppm.

Pembuatan Larutan Standar

Larutan baku Cu 1000 ppm di ambil sebanyak 25 ml di masukkan ke dalam labu tentukur dan di buat larutan standar dengan konsentrasi 100; 10; 2,0; 1,0; 0,5; 0,1 ppm dengan di ditambahkan aquades sampai tanda batas lalu dihomogenkan (SNI 6989.6.2009 ,2009).

Analisis Menggunakan AAS

Analisis kandungan logam menggunakan AAS dengan panjang gelombang 324 nm. Larutan standar Cu dengan konsentrasi yaitu 0,1; 0,5; 1,0; dan 2,0 ppm, dan aquades sebagai blanko. Analisis kandungan Cu pada supernatan, sel pelet dan tailing. Isolat yang mampu mengakumulasi Cu paling tinggi berpotensi sebagai agen *bioleaching* (SNI 6989.6.2009 ,2009).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Sifat Fisik dan Kimia Sampel Tailing

Analisis Sifat fisik dan kimia sampel tailing meliputi analisis kandungan Cu dan pengukuran pH Tailing (Tabel 1). Analisis kandungan Cu menggunakan AAS.

Sebelum dilakukan isolasi bakteri maka dilakukan analisis kandungan Cu pada sampel tailing. Hasil AAS menunjukkan bahwa sampel tailing yang digunakan mengandung Cu sebesar 9,35 mg/L. Untuk uji *leaching* menggunakan tailing dengan konsentrasi Cu

lebih tinggi (63,98 mg/L) dari pada konsentrasi dalam tailing sumber isolat. Hal ini dilakukan untuk memaksimalkan efisiensi ekstraksi. Ketika Konsentrasi lebih tinggi dapat meningkatkan gradien konsentrasi dan laju perpindahan massa, sehingga proses leaching berjalan lebih cepat dan efisien dibandingkan jika menggunakan konsentrasi yang lebih rendah (Massora *et al*, 2019).

Tabel 1. Kandungan Cu pada Sampel Tailing

No.	Sampel	Kandungan Cu (mg/L)	pH
1.	Sampel Tailing Sumber Isolat	9,35	6
2.	Sampel Tailing untuk Uji Kemampuan Bioleaching	63,98	6,21

Isolasi dan Pemurnian Bakteri

Sampel tailing diambil sebanyak 1 ml dari pengenceran 10^{-2} dan 10^{-3} lalu inokulasikan pada media NA dengan menggunakan metode tuang dan diinkubasi pada suhu 30°C selama 24-48 jam. Diperoleh sebanyak 8 isolat dari jumlah koloni yang tumbuh pada media NA (Gambar 1). Kemudian 8 isolat tersebut dipurifikasi pada media NA menggunakan metode gores kuadran dan diinkubasi pada suhu 30°C selama 24-48 jam. Isolat murni yang diperoleh diinokulasikan pada NA miring dan diinkubasi pada suhu 30°C selama 24-48 jam.

Uji Kandungan Konsentrasi Tembaga (Cu) pada Isolat

Sebanyak 8 isolat bakteri yang diisolasi dari tailing bekas tambang emas, digunakan

dalam penelitian ini. Delapan isolat bakteri tersebut terdiri dari PW1, PW2, PW3, PW4, PW5, PW6, PW7 dan PW8 diuji kemampuannya mengakumulasi Cu menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*). Hasil Analisis kandungan tembaga (Cu) dari delapan isolat yang diuji menggunakan AAS (Tabel 2).

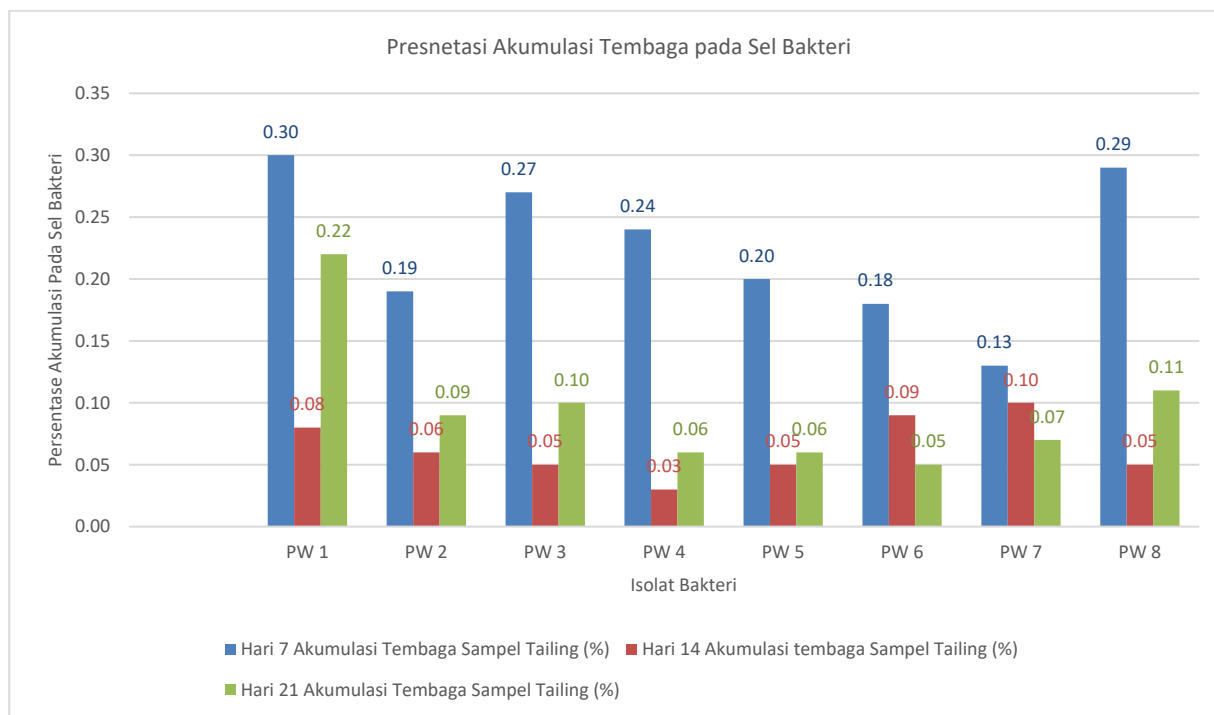
Berdasarkan Tabel 1, kandungan Cu pada tailing cukup tinggi, sehingga diperlukan upaya remediasi untuk mencegah pencemaran lingkungan. Hasil uji juga menunjukkan bahwa seluruh isolat mampu mengekstraksi Cu dari tailing. Berdasarkan hasil AAS, isolat PW1, PW8, dan PW3 memiliki kemampuan ekstraksi Cu paling tinggi. Variasi kemampuan biosorpsi logam berat oleh mikroorganisme dipengaruhi oleh berbagai faktor sehingga hasil yang diperoleh antar-isolat berbeda.



Gambar 3. Isolat bakteri dari Tailing Tambang Emas Distrik Sausapor Kampung Warmanen

Tabel 2. Hasil Analisis Tembaga (Cu) Pada Isolat Menggunakan AAS

No	Kode Isolat	Hari					
		7		14		21	
		Akumulasi Tembaga (mg/L)	Akumulasi Tembaga pada Isolat (%)	Akumulasi Tembaga (mg/L)	Akumulasi tembaga pada Isolat (%)	Akumulasi Tembaga (mg/L)	Akumulasi Tembaga pada Isolat (%)
1	PW 1	19,65	0,30	5,40	0,08	8,22	0,22
2	PW 2	12,24	0,19	4,26	0,06	6,21	0,09
3	PW 3	17,79	0,27	3,21	0,05	6,60	0,10
4	PW 4	15,51	0,24	2,31	0,03	4,05	0,06
5	PW 5	12,99	0,20	3,45	0,05	4,23	0,06
6	PW 6	11,61	0,18	5,76	0,09	3,37	0,05
7	PW 7	8,85	0,13	6,57	0,10	4,68	0,07
8	PW 8	19,02	0,29	3,72	0,05	7,41	0,11



Gambar 4. Persentase Akumulasi Tembaga Pada isolat Bakteri

Perbedaan kemampuan pengikatan atau akumulasi logam oleh masing-masing bakteri dipengaruhi oleh produk metabolik yang dihasilkan selama proses. Secara umum, proses pengikatan logam berat oleh bakteri ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu jenis dan konsentrasi logam dalam limbah, kemampuan bakteri dalam menyerap logam, serta kondisi lingkungan yang mempengaruhi

aktivitas bakteri (Rakhmawati dan Yulianti, 2015).

Logam berat dalam medium dapat menghambat pertumbuhan bakteri. Menurut Ryan dan Enny (2014), logam dapat mengganggu sel mikroorganisme dengan menghentikan fungsi enzim. Pada enzim yang mengandung sistein, ion logam seperti Cd^{2+} dan Pb^{2+} dapat menggantikan gugus sulfhidril sehingga enzim kehilangan fungsinya.

Kondisi ini menghambat metabolisme sel dan menurunkan jumlah sel yang dihasilkan.

Mekanisme penyerapan ion logam bergantung pada sifat fisik dan kimia dinding sel bakteri serta karakteristik ion logam tersebut. Ion logam berat (kation) dapat terikat pada permukaan dinding sel melalui adhesi (McLean *et al.*, 1994). Gugus anion pada dinding sel bakteri, termasuk bakteri termofilik, berperan dalam penempelan ion logam, sehingga konsentrasi logam dalam medium dapat berkurang akibat tertahan pada dinding sel.

Pada hari ke-14, akumulasi Cu oleh isolat mengalami penurunan, kemudian meningkat kembali pada hari ke-21. Variasi ini dipengaruhi oleh dinamika pertumbuhan populasi, produk metabolik, dan kondisi lingkungan. Proses biosorpsi sebagai penyerapan pasif melibatkan pertukaran ion monovalen dan divalen seperti Na^+ , Mg^{2+} , dan Ca^{2+} pada dinding sel yang kemudian digantikan oleh ion logam berat. Menurut Javanbakht *et al.*, (2014), penyerapan logam juga dapat terjadi melalui pembentukan kompleks antara ion logam dengan gugus fungsional seperti karbonil, amino, hidroksil, fosfat, dan hidroksi-karbonil pada dinding sel. Selain itu, beberapa bakteri mampu mengikat logam berat secara intraseluler melalui pembentukan kompleks dengan metallothionein (MTs) (Rajendran *et al.*, 2003).

Setiap bakteri memiliki ketahanan berbeda terhadap logam berat. Proses bioleaching juga dipengaruhi oleh lama kontak antara bakteri, medium, dan permukaan partikel. Menurut Seidel *et al.*, (2001), semakin lama bakteri berada dalam medium, semakin banyak bakteri yang melekat pada permukaan partikel, sehingga aktivitas bioleaching meningkat. pH tailing bekas penambangan emas di Kampung Warmanen adalah 6, dan pH merupakan faktor penting dalam bioleaching karena memengaruhi pertumbuhan mikroba serta struktur komunitasnya. pH rendah dapat menghambat pertumbuhan dan aktivitas oksidatif mikroba, yang berdampak pada penurunan efisiensi penghilangan logam.

Efisiensi bioleaching cenderung meningkat pada pH yang lebih tinggi, meskipun peningkatannya bervariasi (Yang *et al.*, 2018).

Beberapa bakteri Gram negatif diketahui memiliki kemampuan akumulasi tembaga lebih tinggi dibanding bakteri Gram positif (Rani dan Goel, 2009). Isolat PW1, PW3, dan PW8 termasuk kelompok bakteri Gram negatif, sehingga memiliki kemampuan pengikatan Cu lebih baik (Madigan *et al.*, 2000).

Bioleaching merupakan metode efektif untuk mengolah bijih berkadar rendah dan limbah metalurgi (termasuk tailing). Proses ini umum digunakan untuk mengekstraksi logam seperti Cu, emas, nikel, dan uranium dari bijih sulfida. Bioleaching sulfida dapat berlangsung secara langsung, yaitu mikroba mengoksidasi mineral secara kontak langsung, atau tidak langsung, yaitu melalui oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} yang kemudian mengoksidasi mineral sulfida. Hasil reaksi berupa sulfat logam yang larut sehingga mudah diekstraksi (Chaerun *et al.*, 2017; Chaerun *et al.*, 2018).

KESIMPULAN

Proses *bioleaching* menggunakan isolat bakteri *indigenous* dari tailing bekas penambangan emas Warmanen terbukti efektif menurunkan konsentrasi Cu. Delapan isolat bakteri dengan akumulasi paling tinggi hari ke ketujuh PW 1 (0,30%), PW 2 (0,19%), PW 3 (0,27%), PW 4 (0,24%), PW 5 (0,20%), PW 6 (0,18%), PW 7 (0,13%), PW 8 (0,29%). Dari Akumulasi tersebut 3 isolat bakteri menunjukkan potensi tertinggi yaitu PW 1, PW 3, dan PW 8, isolat paling tinggi akumulasi Cu yaitu PW 1 dengan akumulasi 0,30%.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. (2009). *Cara uji tembaga (Cu) secara spektrofotometer serapan atom (SSA) nyala* (SNI 6989-6). Dewan Standardisasi Indonesia.

Chaerun, S. K., Putri, F. Y., Mubarok, M. Z.,

- Minwal, W. P., & Ichlas, Z. T. (2017). Bioleaching of supergene porphyry copper ores from Sungai Mak, Gorontalo of Indonesia by an iron- and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium. *Solid State Phenomena*, 262, 20–23.
- Chaerun, S. K., Putri, F. Y., Minwal, W. P., Ichlas, Z. T., & Mubarak, M. Z. (2018). Bacterial leaching of an Indonesian complex copper sulfide ore using an iron-oxidizing indigenous bacterium. *Microbiology Indonesia*, 12(1), 1–8.
- Fidiastuti, H. R., & Suarsini, E. (2017). Potensi bakteri indigen dalam mendegradasi limbah cair pabrik kulit secara *in vitro*. *Bioeksperimen*, 3(1).
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7, 60–72.
- Javanbakht, V., Alavi, S. A., & Zilouei, H. (2014). Mechanisms of heavy metal removal using microorganisms as biosorbent. *Water Science and Technology*, 69(9), 1775–1787.
- Kulyasin, I., Iyai, J., & Rumbekwan, A. (2024). Pertambangan emas Topo sebagai alternatif mengatasi krisis moneter (1997–2000). *Jurnal Historical Cenderawasih*, 1(1), 1–8.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2000). *Biology of microorganisms* (9th ed.). Prentice Hall.
- Marzec-Grządziel, A., & Gałazka, A. (2023). Sequencing of the whole genome of a bacterium of the genus *Achromobacter* reveals its potential for xenobiotics biodegradation. *Agriculture*, 13(8), 1519.
- Massora, M., Martani, E., Sugiharto, E., Sarwom, R., & Sinaga, T. (2017). Biofilm formation analysis and molecular identification of copper-resistant bacteria isolated from PT Freeport Indonesia's tailings. *Indonesian Journal of Biotechnology*, 22(1), 6-12.
- McLean R.J.C., Campbell A.M, Khu P.T. Persand A.T. Bickerton, L.E., Beauchemin, D. 1994. Repeated Use of *Bacillus subtilis* cell walls for Copper binding. *World Journal of Microbiol. & Biotech.* 10: 472-474.
- Nazmi, A. S. (2011). *Karakterisasi dan penentuan kandungan limbah tailing pertambangan emas rakyat di daerah Selogiri Kabupaten Wonogiri Jawa Tengah*.
- Nuriadi, Napitupulu, M., & Rahman, N. (2013). Analisis logam tembaga (Cu) pada buangan limbah tromol (tailing) pertambangan Poboya. *Jurnal Akademika Kimia*, 2(2), 90–96.
- Rani, A., & Goel, R. (2009). *Microbial strategies for crop improvement*. Springer.
- Rajendran P., J. Muthukrishnan, and P. Gunasekaran. 2003. Microbes in Heavy Metal Remediation. *Indian Journal of Experimental Biology*. Vol.41:935-944.
- Ryan Widi Anggar Kusuma dan Enny Zulaika. 2014. Potensi *Chlorella* sp. sebagai Bioakumulator Logam Berat Kadmium. *Jurnal Sains dan Seni Pom-its*. Vol. 3, No. 2, (2301-9271).
- Sarkodie, E. K., Jiang, L., & Li, K. (2022). A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and influencing factors. *Frontiers in*

Microbiology.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1049277>

- Seidel, D. J., Ross, R. J., Angell, J. K., & Reid, G. C. (2001). Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D8), 7857–7878.
- Shazmin, Ahmad, S. A., Naqvi, T. A., Munis, M. F. H., Javed, M. T., & Chaudhary, H. J. (2023). Biodegradation of monocrotophos by *Brucella intermedia* Msd2 isolated from cotton plant. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(6), 141.
- Suryani, Y. (2011). Bioremediasi limbah merkuri dengan menggunakan mikroba pada lingkungan yang tercemar. *Jurnal ISTEK*, 5(1–2).
- Susilawati, R. (2015). Bioleaching for the recovery of metal. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 10(3).
- Yang, Z., Shi, W., Yang, W., Liang, L., Yao, W., Chai, L., et al. (2018). Combination of bioleaching by gross bacterial biosurfactants and flocculation: A potential remediation for heavy metal–contaminated soils. *Chemosphere*, 206, 83–91.
- Yulianti, E., Rakhmawati, A., & Pertiwi, K. R. (2015). Optimasi produksi senyawa antimikrobia pada *cell-free extract* hasil fermentasi bakteri termofilik pasca erupsi Merapi.