



Bioremediation of Mercury in Laboratory Wastewater Using *Bacillus cereus* and *Pseudomonas aeruginosa*

Husnny Risdyanza¹⁾, Nia Yuliani^{2)*} dan Nina Ariesta¹⁾

¹⁾Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nusa Bangsa, Bogor, Indonesia

²⁾Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nusa Bangsa, Bogor, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 06 Jul 2026,

Revised 30 Jul 2026,

Accepted 06 Aug 2026

Available online 15 Aug 2026

Keywords:

- ✓ Bioremediation,
- ✓ *Bacillus cereus*,
- ✓ heavy metal,
- ✓ mercury,
- ✓ *Pseudomonas aeruginosa*

*corresponding author:

niayuliani0412@gmail.com

Phone: +62 8121115731

<https://doi.org/10.31938/jsn.v16i2.1055>

ABSTRACT

Mercury (Hg) is a toxic, persistent, and bioaccumulative heavy metal that can contaminate the environment and pose risks to human health. Laboratory wastewater containing mercury requires effective and environmentally friendly treatment technologies before being discharged into water bodies. One promising alternative is bioremediation using heavy metal-resistant bacteria. This study aimed to determine the optimum conditions for mercury (Hg) bioremediation using *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and their consortium based on variations in pH, incubation time, and initial Hg concentration, as well as to evaluate the ability of each bacterial culture and the consortium to reduce Hg concentrations in laboratory wastewater. The study employed a laboratory-based experimental design, with optimization experiments conducted at pH 5, 6, 7, and 8; incubation times of 24–120 hours; and initial Hg concentrations of 5–25 mg/L. Mercury concentrations were analyzed using atomic absorption spectrophotometry (AAS). The results showed that the optimum bioremediation conditions were pH 7, an incubation time of 96 hours, and an initial Hg concentration of 5 mg/L. *P. aeruginosa* exhibited a higher mercury reduction capacity than *B. cereus*, whereas the use of the bacterial consortium resulted in the highest removal efficiency. When applied to laboratory wastewater, the bacterial consortium reduced the mercury concentration by up to 73.45%, which was higher than that achieved using individual bacterial cultures. Nevertheless, the final mercury concentration remained above the applicable quality standard, indicating that further treatment is required before the wastewater can be discharged into the environment. These findings demonstrate that the combination of *B. cereus* and *P. aeruginosa* has potential as an environmentally friendly bioremediation agent for the treatment of mercury-containing wastewater.

ABSTRAK

Bioremediasi Logam Merkuri (Hg) pada Limbah Laboratorium Lingkungan dengan *Bacillus cereus* dan *Pseudomonas aureginosa*

Merkuri (Hg) merupakan logam berat yang bersifat toksik, persisten, dan bioakumulatif sehingga berpotensi mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia. Air limbah laboratorium yang mengandung merkuri memerlukan teknologi pengolahan yang efektif dan ramah lingkungan sebelum dibuang ke badan air. Salah satu alternatif yang berkembang adalah bioremediasi menggunakan bakteri resisten terhadap logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kondisi optimum proses bioremediasi merkuri (Hg) menggunakan *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan konsorsiumnya berdasarkan variasi pH, waktu inkubasi, dan konsentrasi awal Hg, serta mengevaluasi kemampuan masing-masing bakteri dan konsorsium dalam menurunkan konsentrasi Hg pada air limbah laboratorium. Penelitian menggunakan rancangan eksperimen laboratorium dengan pengujian optimasi pada pH 5, 6, 7, dan 8; waktu inkubasi 24–120 jam; serta konsentrasi awal Hg 5–25 mg/L. Kandungan merkuri dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum bioremediasi diperoleh pada pH 7, waktu inkubasi 96 jam dan konsentrasi 5 mg/L. *P. aeruginosa* menunjukkan kemampuan reduksi merkuri lebih tinggi dibandingkan dengan *Bacillus cereus*, sedangkan penggunaan konsorsium menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi. Pada aplikasi terhadap limbah laboratorium, konsorsium bakteri mampu menurunkan konsentrasi merkuri hingga 73,45%, lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan kultur tunggal. Meskipun demikian, kadar merkuri akhir masih berada di atas baku mutu sehingga diperlukan pengolahan lanjutan sebelum limbah dibuang ke lingkungan. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi *B. cereus* dan *P. aeruginosa* berpotensi dikembangkan sebagai agen bioremediasi ramah lingkungan untuk pengolahan limbah yang mengandung merkuri.

Kata kunci: Bioremediasi, *Bacillus cereus*, logam berat, merkuri, *Pseudomonas aeruginosa*



PENDAHULUAN

Limbah laboratorium dapat terdiri dari limbah cair, gas, atau padat yang berasal dari sisa buangan kegiatan laboratorium, berasal dari berbagai sumber: bahan kimia yang sudah kedaluwarsa, bahan habis pakai yang pecah atau rusak, sisa sampel, sisa reagen dari reaksi-reaksi kimia, bahkan air bekas mencuci peralatan (Nurhayati & Sugito, 2018). Laboratorium jasa analisa lingkungan juga merupakan laboratorium yang menghasilkan limbah berupa limbah bahan berbahaya dan beracun (B3).

Logam berat (Cu, Fe, Pb, Cd, Cr, Mn, Zn, Hg, Al, dll.) dan bahan kimia (sianida, pestisida, fenol, dll.) terkandung dalam limbah B3 (Anggraini et al., 2022). Salah satu limbah pencemar yang menjadi perhatian adalah merkuri (Hg).

Merkuri (Hg) adalah salah satu logam berat berbahaya yang digunakan secara luas di berbagai bidang, seperti industri, pertanian, kedokteran, serta kegiatan pertambangan, khususnya penambangan emas tradisional melalui proses amalgamasi (Bagia et al., 2023). Penggunaan merkuri yang tidak teratur dapat mengakibatkan pencemaran lingkungan karena logam ini bersifat persisten, mudah terakumulasi dalam rantai makanan, dan tersebar di berbagai tempat seperti udara, tanah, serta perairan. Bioakumulasi di otak dan ginjal, yang dapat menyebabkan gangguan neurologis, kerusakan ginjal, dan gangguan perkembangan sistem saraf, adalah salah satu gangguan kesehatan serius yang dapat disebabkan oleh paparan merkuri dalam jangka panjang (Pramesti et al., 2019). Upaya penanggulangan bahaya pencemaran yang diakibatkan oleh merkuri telah banyak dilakukan, yaitu secara fisik (filtrasi), kimia (adsorpsi), dan biologi (remediasi). Pencemaran yang disebabkan oleh limbah merkuri dapat didegradasi oleh lingkungan melalui proses biologis, yaitu bioremediasi (Bagia et al., 2023). Bioremediasi merupakan kemampuan mengurai polutan dengan menggunakan mikroorganisme seperti bakteri sehingga tidak menimbulkan pencemaran lebih lanjut (Amalia et al., 2024). Bioremediasi merupakan proses penguraian limbah organik atau anorganik secara biologis dalam kondisi terkendali dengan tujuan mengontrol atau bahkan mereduksi bahan pencemar dari lingkungan (Pramesti et al., 2019).

Agen biologis penting yang dapat dimanfaatkan untuk bioremediasi logam berat, termasuk merkuri bisa berasal dari

mikroorganisme. Mikroorganisme memiliki kemampuan untuk mengurangi toksisitas merkuri melalui aktivitas metabolisme (Idris et al., 2023). Sejumlah bakteri diketahui memiliki mekanisme ketahanan terhadap merkuri melalui keberadaan operon mer, yang mengode protein transporter dan enzim merkuri reduktase (MerA). Enzim tersebut memiliki kemampuan untuk mengubah ion Hg^{2+} menjadi Hg^0 yang lebih tidak volatile, sehingga memungkinkan merkuri keluar dari sistem biologis melalui proses volatilitas, mekanisme ini merupakan bentuk resistensi bakteri terhadap merkuri, yang mengurangi tingkat toksisitasnya (de Mattos et al., 2024). Bakteri *Bacillus cereus* dan *Pseudomonas aeruginosa* adalah dua bakteri yang telah banyak dilaporkan memiliki kemampuan tersebut. *B. cereus* merupakan bakteri Gram positif yang memiliki kapasitas biosorpsi tinggi melalui komponen dinding selnya, sedangkan *P. aeruginosa*, sebagai bakteri Gram negatif, dikenal memiliki sistem resistensi logam berat yang kompleks, termasuk keberadaan plasmid dan gen resistensi merkuri yang mendukung proses detoksifikasi merkuri (Amin et al., 2022).

Berbagai penelitian telah melaporkan kemampuan *Bacillus* spp. dan *Pseudomonas* spp. dalam mereduksi atau menurunkan merkuri dari media yang terkontaminasi. Namun, penelitian mengenai penggunaan bakteri *B. cereus* dan *P. aeruginosa* serta konsorsiumnya dalam menurunkan kadar merkuri masih terbatas, sehingga penelitian ini bertujuan untuk menentukan kondisi optimum proses bioremediasi merkuri (Hg) menggunakan *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan konsorsiumnya berdasarkan variasi pH, waktu inkubasi, dan konsentrasi awal Hg, serta mengevaluasi kemampuan masing-masing bakteri dan konsorsium dalam menurunkan konsentrasi Hg pada air limbah laboratorium.

BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bakteri *B. cereus* ATCC® 11778™* dan *P. aeruginosa* ATCC® 27853™*, media Brain Heart Infusion Broth (BHIB) (Merck), media Plate Count Agar (PCA) (Merck), Pengencer Maximum Recovery Diluent (MRD) (Neogen), $KMnO_4$ (Merck), $K_2S_2O_8$ (Merck), NaCl (Merck), Hidroksilamin sulfat (Merck), $SnCl_2$ (Merck), HNO_3 pekat (Merck), HCl pekat (Merck), Larutan Standar Merkuri (Merck), akuades (Resia Niaga).

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas laboratorium, Spektrofotometri Serapan Atom (AAS) (*Shimadzu*), Penangas Air (*Memmert*), Autoclave (*Hirayama*), Laminar Air Flow (*Robust*), pH meter (*Eutech*), botol sampel, dan peralatan gelas.

Metode

Metode yang digunakan adalah eksperimental dengan objek isolat bakteri *B. cereus* dan *P. aeruginosa*. Kedua isolat akan diuji kemampuannya dalam menyerap logam Hg pada limbah cair laboratorium lingkungan.

Pengambilan Sampel limbah cair Laboratorium Lingkungan (SNI 6989.59:2008)

Proses pengambilan sampel limbah cair Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) di PT. Anugrah Analisis Sempurna dilakukan dengan proses *grab sample*. Sampel diambil pada titik keluaran (effluent) limbah cair. Limbah cair yang telah diambil kemudian dimasukkan ke dalam botol untuk selanjutnya disimpan ke dalam cooler box ($4 \pm 2^\circ\text{C}$). Pengujian beberapa parameter secara in situ dilakukan, seperti pengukuran pH, menggunakan pH meter yang sebelumnya sudah dikalibrasi dengan menggunakan larutan buffer standar pH 4 dan pH 7. Sampel yang telah disimpan ke dalam cooler box kemudian dilakukan proses pengawetan, yaitu dengan cara diasamkan menggunakan HNO_3 pekat secukupnya hingga pH sampel < 2 , kemudian sampel disimpan sesuai persyaratan metode analisis.

Analisis Logam Merkuri dalam Air Limbah (SNI 6989.78:2011)

Larutan standar kerja Hg dibuat dari larutan standar induk dengan konsentrasi 10 mg/L. Larutan standar kerja dengan konsentrasi 0,0007; 0,0010; 0,0020; 0,0050; 0,0100; 0,0200 mg/L dimasukkan ke dalam labu ukur 50 mL, selanjutnya larutan deret standar Hg dilarutkan dengan akuabides sampai mendekati tanda batas, kemudian dihimpitkan hingga tanda batas dan dihomogenkan. Deret standar yang telah dibuat

digunakan untuk memperoleh kurva kalibrasi instrument (Table 1).

Sebanyak 100 ml larutan sampel limbah dimasukkan ke dalam *Erlenmeyer* 250 ml, kemudian ditambahkan 5 ml asam sulfat (H_2SO_4) dan 2,5 ml asam nitrat (HNO_3) pekat, lalu ditambahkan 15 ml KMnO_4 hingga warna menjadi ungu dan tidak hilang. Sebanyak 8 ml kalium persulfat ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ditambahkan sebagai katalis, setelah itu dipanaskan dan didestruksi dengan penangas air selama 2 jam pada suhu 95°C , kemudian larutan sampel didinginkan dan ditambahkan hidroksilamin- NaCl untuk mereduksi kelebihan KMnO_4 . Timah (II) Klorida (SnCl_2) ditambahkan sebanyak 5 mL dan kemudian diukur menggunakan SSA yang dilengkapi dengan instrument *mercury vapor unit* yang sudah dioptimalkan sesuai petunjuk alat. Kadar logam sampel limbah cair ($\mu\text{g/mL}$) dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Konsentrasi sampel } (\mu\text{g/mL}) = \frac{\text{intensitas} - \text{intercept}}{\text{slope}} \times \text{fp}$$

Sterilisasi Alat dan Bahan

Alat yang digunakan seperti peralatan gelas disterilisasi kering dengan menggunakan oven pada suhu 180°C selama 2 jam, sedangkan untuk peralatan plastik yang berbahan dasar Polypropylene yang biasa digunakan sebagai wadah di laboratorium, media, sampel dan standar logam untuk optimasi disterilisasi dengan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C dengan tekanan 1 atm selama 20 menit

Aktivasi Kultur Bakteri *Bacillus cereus* dan *Pseudomonas aeruginosa*

Biakan bakteri *B. cereus* dan *P. aeruginosa* dalam bentuk ampul diaktivasi dengan memasukkan kedua bakteri ke dalam 1 L media BHIB lalu diinkubasi. Table 2 menunjukkan waktu inkubasi dan suhu optimum untuk pertumbuhan kedua bakteri.

Table 1. Preparation of a standard series from a 10 mg/L concentration.

Konsentrasi (mg/L)	0,0007	0,0010	0,0020	0,0050	0,0100	0,0200
Volume dipipet (mL)	3,5	5,0	10	25	50	100

Table 2. Optimum temperature and time for bacterial growth.

Nama Bakteri	Suhu	Waktu
<i>Bacillus cereus</i>	30°C	24 jam
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	35°C	24 jam

Analisis Angka Lempeng Total (ALT) (ISO 4833-1: 2013)

Setelah kedua bakteri diaktivasi, dilakukan Analisis Angka Lempeng Total (ALT) dengan serial pengenceran menggunakan MRD 10^{-1} hingga 10^{-10} . ALT dilakukan untuk menentukan jumlah bakteri hidup dalam kultur yang dinyatakan sebagai *Colony Forming Unit* (CFU/mL). Sebanyak 1 mL kultur dimasukkan ke dalam 9 mL MRD steril untuk memperoleh pengenceran 10^{-1} , kemudian dipipet 1 mL dari MRD 10^{-1} ke dalam MRD 10^{-2} dan seterusnya hingga 10^{-10} , kemudian dari masing-masing pengenceran dimasukkan sebanyak 1 mL ke dalam cawan petri secara simplo dan duplo. Selanjutnya, setiap pengenceran dimasukkan ke dalam 15 mL media PCA. Suspensi bakteri dan media kemudian dihomogenkan secara perlahan dengan gerakan memutar agar bakteri tersebar merata dalam media. Setelah media memadat, cawan petri dimasukkan dengan posisi terbalik ke dalam inkubator pada suhu 30 ± 1 °C selama 72 ± 3 jam.

Optimasi pH Bioremediasi Logam Merkuri (Modifikasi) (Isa & Retnowati, 2014)

Optimasi pH dilakukan untuk menentukan kondisi pH yang paling sesuai bagi aktivitas *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan konsorsiumnya dalam menurunkan konsentrasi merkuri berdasarkan persentase penurunan Hg setelah periode inkubasi. Secara aseptis dipipet sebanyak 10 ml stok kultur *B. cereus*, kemudian dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer yang sudah berisi 150 mL media BHIB dan mengandung logam Hg (konsentrasi Hg disesuaikan dengan kadar awal sampel), selanjutnya diinkubasi selama 24 jam dan dilakukan pengocokan menggunakan shaker (kecepatan 100 rpm) agar homogen. Uji optimasi pH dilakukan pada kondisi pH 2, 5, 7, 9, 12 dengan suhu inkubasi (± 25 °C). Pada akhir setiap uji reduksi, larutan uji ditambahkan 2 tetes H_2SO_4 pekat untuk menghentikan aktivitas biologis bakteri. Selanjutnya, larutan uji disentrifugasi dengan kecepatan 120 rpm selama 20 menit untuk memisahkan sel kultur dari filtratnya, kemudian filtrat dianalisis untuk mengetahui kadar Hg

dengan alat SSA. Perlakuan yang sama digunakan untuk bakteri *P. aeruginosa*.

Optimasi Waktu Inkubasi Bioremediasi Logam Merkuri (Modifikasi) (Isa & Retnowati, 2014)

Secara aseptis, dipipet sebanyak 10 ml stok kultur *B. cereus*, dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer yang sudah berisi 150 mL media BHIB dan mengandung logam Hg (pH disesuaikan, optimasi pH, dan konsentrasi Hg disesuaikan dengan kadar awal sampel), selanjutnya diinkubasi dan dihomogenkan dengan shaker (kecepatan 100 rpm). Untuk uji Hg dilakukan selama 24 jam, 48 jam, 72 jam, 96 jam, 120 jam pada suhu ruang. Pada akhir setiap uji reduksi, larutan uji ditambahkan 2 tetes H_2SO_4 pekat untuk menghentikan aktivitas biologis bakteri. Selanjutnya, larutan uji disentrifugasi selama dua puluh menit dengan kecepatan 120 rpm untuk membedakan sel kultur dari filtratnya. Selanjutnya, alat SSA digunakan untuk memeriksa filtrat untuk kadar Hg. Perlakuan yang sama digunakan untuk bakteri *P. aeruginosa*.

Uji Kemampuan Bioremediasi Logam Merkuri dalam Air Limbah Laboratorium (Modifikasi) (Isa & Retnowati, 2014)

Secara aseptis dipipet sebanyak 10 ml stok kultur *B. cereus* yang telah diaktivasi, selanjutnya dihitung menggunakan ALT untuk menentukan kepadatan sel hidup dalam satuan CFU/mL. Kultur kemudian distandardisasi hingga diperoleh kepadatan inokulum awal, kemudian dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer yang sudah berisi 150 ml sampel limbah cair laboratorium dan media BHIB sebanyak 5,5 gram. Penambahan BHIB bertujuan sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan bakteri selama proses bioremediasi. Selanjutnya, diinkubasi dan pengocokan dengan shaker (kecepatan 100 rpm) agar homogen. Waktu inkubasi dan pH disesuaikan dengan hasil uji optimasi. Pada akhir setiap uji reduksi, larutan uji ditambahkan 2 tetes H_2SO_4 pekat untuk menghentikan aktivitas biologis bakteri. Kemudian larutan uji disentrifugasi dengan kecepatan 120 rpm selama 20 menit untuk memisahkan sel kultur dari filtratnya. Selanjutnya, filtrat dianalisis untuk

mengetahui kadar Hg dengan alat SSA. Perlakuan yang sama untuk bakteri *P. aeruginosa*.

Uji kemampuan Konsorsium (gabungan bakteri) pada Bioremediasi Logam Merkuri (Modifikasi) (Isa & Retnowati, 2014)

Secara aseptis, dipipet sebanyak 5 ml stok kultur *B. cereus* dan 5 ml stok kultur *P. aeruginosa* dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer yang sudah berisi 150 mL media BHIB yang mengandung logam Hg. Selanjutnya, diinkubasi dan pengocokan dengan shaker (kecepatan 100 rpm) agar homogen pada suhu ruang. pH, waktu inkubasi, dan konsentrasi Hg disesuaikan dengan hasil optimasi. Pada akhir setiap uji reduksi, larutan uji ditambahkan 2 tetes H₂SO₄ pekat untuk membunuh bakteri. Kemudian larutan uji disentrifugasi dengan kecepatan 120 rpm selama 20 menit untuk memisahkan sel kultur dengan filtratnya. Selanjutnya, filtrat dianalisis untuk mengetahui kadar Hg dengan alat SSA.

Analisis Data

Hasil pengukuran analisis baku mutu air limbah laboratorium dibandingkan dengan Peraturan Pemerintah No.82 Tahun 2021. Kadar zat pencemar hasil analisis sebelum dan sesudah dilakukannya reduksi dengan bakteri dibandingkan, dan kemudian dihitung persentase penurunan parameter kimia (%Daya Reduksi), dengan rumus :

$$\% \text{Daya Reduksi} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$

C₀ : Konsentrasi parameter kimia sebelum reduksi

C₁ : Konsentrasi parameter kimia setelah reduksi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Angka Lempeng Total (ALT) Bakteri *Bacillus cereus* dan *Pseudomonas aeruginosa*

Hasil pengujian Angka Lempeng Total (ALT), kedua isolat bakteri yang digunakan dalam penelitian memiliki jumlah sel seperti terlihat pada Table 3. Hasil pengujian ALT menunjukkan bahwa kepadatan inokulum *B. cereus* sebesar $4,5 \times 10^7$ CFU/mL, sedangkan kepadatan inokulum *P. aeruginosa* sebesar $3,4 \times 10^8$ CFU/mL. Hasil menunjukkan bahwa kepadatan inokulum *P. aeruginosa* lebih tinggi dibandingkan dengan *B. cereus*. Kemampuan kedua isolat untuk

mengurangi konsentrasi merkuri pada tahap pengujian bioremediasi dapat dipengaruhi oleh perbedaan kepadatan inokulum. Padataan inokulum yang lebih tinggi dapat menyebabkan lebih banyak biomassa dan situs pengikatan pada permukaan sel. Ini meningkatkan interaksi antara sel bakteri dan ion Hg²⁺ melalui mekanisme bioakumulasi dan biosorpsi (Nnaji et al., 2023).

Table 3. Total Plate Count of *B. cereus* and *P. aeruginosa*

Bakteri	Jumlah Sel (CFU/mL)
<i>Bacillus cereus</i>	$4,5 \times 10^7$
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	$3,4 \times 10^8$

Selain jumlah biomassa, kemampuan bakteri dalam meremediasi merkuri juga dipengaruhi oleh sifat fisiologis dan metabolisme masing-masing isolat. Bakteri dengan sistem resistensi merkuri dapat membawa operon, kelompok gen yang bertanggung jawab atas transpor, detoksifikasi, dan transformasi senyawa merkuri. Salah satu gen penting dalam sistem tersebut adalah merA, yang mengode enzim merkuri reduktase. Enzim merA mengkatalisis reduksi ion Hg²⁺ menjadi merkuri elemental (Hg⁰), yang bersifat volatil dan memiliki toksisitas serta reaktivitas biologis yang lebih rendah dibandingkan Hg²⁺ (Golyseva et al., 2025; de Mattos et al., 2024). Menurut hasil ALT, kedua isolat memiliki kepadatan inokulum yang memadai untuk digunakan pada tahap pengujian bioremediasi.

Optimasi pH

Optimasi pH dilakukan untuk menentukan kondisi lingkungan yang paling optimum bagi aktivitas *B. cereus* dan *P. aeruginosa* dalam mereduksi logam berat merkuri (Hg). Nilai pH merupakan salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap pertumbuhan bakteri, aktivitas enzim, permeabilitas membran sel, serta spesiasi logam berat di dalam media. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua isolat bakteri mampu mereduksi Hg pada seluruh perlakuan pH, namun penurunan kadar berbeda-beda (Table 4). Kondisi pH optimum pada penelitian ini menunjukkan bahwa pH optimum kedua bakteri, yaitu pada pH 7, dengan persentase penurunan kadar merkuri pada *B. cereus* sebesar 23,60% dan pada *P. aeruginosa* sebesar 30,94%.

Table 4. Reduction of mercury levels based on pH variations

Bakteri	pH	Waktu Inkubasi (Jam)	Konsentrasi Awal (mg/L)	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Penurunan Kadar (%)
<i>Bacillus cereus</i>	2	24	5	4.9845	0.31
	5	24	5	4.3200	13,60
	7	24	5	3.8201	23,60
	9	24	5	4.4719	10,56
	12	24	5	5.0098	-0.20
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	2	24	5	4.9908	0.18
	5	24	5	4,4529	10.94
	7	24	5	3,4530	30,94
	9	24	5	4,4592	10,82
	12	24	5	4,9781	0,44

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemampuan bakteri *B. cereus* dan *P. aeruginosa* untuk menurunkan konsentrasi merkuri dipengaruhi oleh nilai pH. Penurunan kadar merkuri meningkat seiring kenaikan pH dari 5 hingga mencapai pH optimum pada pH 7, kemudian kembali menurun pada pH 9. Pada kondisi pH netral (sekitar pH 7) merupakan kondisi optimum bagi pertumbuhan bakteri dan aktivitas enzim yang terlibat dalam proses menurunkan toksisitas merkuri, termasuk enzim merkuri reduktase (MerA). Pada kondisi ini, gugus fungsi pada permukaan sel bakteri berada dalam keadaan yang mendukung proses biosorpsi, sedangkan aktivitas metabolisme dan sistem resistensi terhadap merkuri berlangsung secara optimal. Sebaliknya, pada kondisi asam maupun

basa terjadi perubahan muatan permukaan sel, spesiasi merkuri, serta aktivitas enzim yang menyebabkan efisiensi penurunan merkuri menurun (González et al., 2023).

Optimasi Waktu Inkubasi

Optimasi waktu inkubasi dilakukan untuk menentukan lama kontak yang paling efektif antara bakteri dan ion merkuri (Hg) selama proses bioremediasi. Lama inkubasi berpengaruh terhadap penurunan bioremediasi merkuri. Penurunan kadar merkuri meningkat secara bertahap dari inkubasi 24 jam hingga mencapai nilai maksimum pada inkubasi selama 96 jam (Tabel 5).

Table 5. Reduction in mercury levels based on variations in incubation time

Bakteri	Waktu Inkubasi (Jam)	Konsentrasi Awal Hg (mg/L)	Konsentrasi Akhir Hg (mg/L)	Penurunan Kadar (%)
<i>Bacillus cereus</i>	24	5	3,8517	22.97
	48	5	2,6747	46,51
	72	5	1,8837	62,33
	96	5	0,7130	85,74
	120	5	3,4151	81,31
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	24	5	3,4151	31,70
	48	5	2,3646	52,71
	72	5	1,6432	67,14
	96	5	0,5611	88,78
	120	5	0,7446	85,11

Pada *B. cereus*, persentase penurunan Hg meningkat secara bertahap dari 22,97% pada inkubasi 24 jam menjadi 46,51% pada 48 jam, kemudian meningkat menjadi 62,33% pada 72 jam dan mencapai nilai maksimum sebesar 85,74% pada 96 jam. Setelah inkubasi diperpanjang hingga 120 jam, terjadi penurunan menjadi 81,31%. Pola yang serupa juga terlihat pada *P. aeruginosa*, dengan penurunan Hg berturut-turut sebesar 31,70%, 52,71%, 67,14%, dan mencapai nilai tertinggi 88,78% pada inkubasi 96 jam, kemudian menurun menjadi 85,11% pada 120 jam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu inkubasi optimum bagi kedua bakteri adalah 96 jam, di mana bakteri diduga sudah tidak mereduksi logam Hg, yang disebabkan oleh ketersediaan nutrisi yang sudah habis sehingga bakteri masuk ke fase kematian.

Peningkatan penurunan Hg hingga waktu inkubasi 96 jam menunjukkan bahwa bakteri masih berada pada fase pertumbuhan aktif, sehingga aktivitas metabolisme dan mekanisme detoksifikasi logam berlangsung secara optimal. Pada fase ini, bakteri memanfaatkan berbagai mekanisme resistensi terhadap merkuri, seperti biosorpsi pada dinding sel, bioakumulasi intraseluler, serta reduksi ion Hg^{2+} menjadi Hg^0 oleh enzim merkuri reduktase (MerA) yang dikodekan oleh *mer* operon. Aktivitas tersebut menyebabkan konsentrasi merkuri di dalam medium semakin menurun seiring bertambahnya waktu inkubasi. Penelitian terbaru terhadap bakteri resisten merkuri menunjukkan bahwa efisiensi bioremediasi sangat dipengaruhi oleh

laju pertumbuhan sel dan ekspresi sistem *mer*, sehingga kemampuan menurunkan toksisitas meningkat selama fase eksponensial hingga awal fase stasioner (Pereira-García et al., 2024)

Penurunan Hg oleh bakteri *P. aeruginosa* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan *B. cereus* pada seluruh waktu inkubasi menunjukkan bahwa bakteri Gram-negatif tersebut memiliki mekanisme adaptasi yang lebih efektif terhadap cekaman logam berat. Selain mengandalkan sistem *mer*, *P. aeruginosa* diketahui mampu menghasilkan biosurfaktan, membentuk biofilm, dan memiliki sistem transpor logam yang meningkatkan kontak antara sel bakteri dan ion logam sehingga proses biosorpsi dan detoksifikasi berlangsung lebih efisien. Kemampuan tersebut menjadikan *Pseudomonas* sebagai salah satu bakteri yang banyak digunakan dalam aplikasi bioremediasi logam berat (Anaukwu et al., 2024)

Optimasi Konsentrasi

Optimasi konsentrasi dilakukan untuk mengetahui konsentrasi maksimum kedua bakteri yang dapat mereduksi Hg. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kedua bakteri dapat mereduksi Hg dengan konsentrasi 5 mg/L dengan persentase penurunan kadar sebesar 85,36% dan 10 mg/L sebesar 25,48%. Untuk konsentrasi 15 dan 20 mg/L, kedua bakteri kurang dapat mereduksi logam Hg dikarenakan kondisi lingkungan yang ekstrem, yaitu kadar Hg yang tinggi, sehingga selnya sudah teracuni oleh kadar logam Hg. Penurunan kadar merkuri (Hg) disajikan pada Table 6.

Table 6. Reduction of mercury (Hg) levels based on concentration variations

Bakteri	Konsentrasi	Waktu	Konsentrasi	Penurunan Kadar (%)
	Awal Hg (mg/L)	Inkubasi (Jam)	Akhir Hg (mg/L)	
<i>Bacillus cereus</i>	5	96	0,7320	85,36
	10	96	7,4524	25,48
	15	96	14,1201	5,87
	20	96	20,0288	0,14
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5	96	0,5105	89,79
	10	96	7,1233	28,77
	15	96	14,3226	4,52
	20	96	19,9870	0,06

Table 7. *Bioremediation Capability for Reducing Mercury in Laboratory Wastewater*

Nama Bakteri	Konsentrasi Kontrol Negatif (mg/L)	Konsentrasi Kontrol Positif (mg/L)	Penurunan Kadar (%)
<i>Bacillus cereus</i>	5,1679	1,7719	65,71
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5,1679	1,4133	72,65
Konsorsium	5,1679	1,3711	73,45

Pada *B. cereus*, persentase penurunan Hg tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal 5 mg/L, yaitu sebesar 85,36%. Ketika konsentrasi Hg ditingkatkan menjadi 10 mg/L, efisiensi reduksi menurun menjadi 25,48%, kemudian kembali menurun menjadi 5,87% pada konsentrasi 15 mg/L, dan hanya 0,14% pada konsentrasi 20 mg/L. Pola yang sama juga diamati pada *P. aeruginosa*, persentase penurunan Hg diperoleh pada konsentrasi awal 5 mg/L yaitu sebesar 89,79%, pada konsentrasi 10 mg/L menurun menjadi 28,77%, kemudian kembali menurun pada konsentrasi 15 mg/L sebesar 4,52% dan pada konsentrasi 20 mg/L sebesar 0,06%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua bakteri memiliki kemampuan bioremediasi yang sangat baik pada konsentrasi Hg rendah. Menurut Isa & Retnowati (2014), jenis bakteri dan teknik kulturisasinya memengaruhi kemampuan bakteri untuk mengurangi Hg. Bakteri yang dapat bertahan hidup pada konsentrasi HgCl₂ 10 mg/L dianggap memiliki gen yang menahan merkuri. *B. cereus* dan *P. aeruginosa* dianggap memiliki gen yang menahan merkuri.

Bakteri yang resisten terhadap spektrum merkuri sempit disebut sebagai bakteri yang hanya memiliki protein reduktase merkuri (MerA). Bakteri lain memiliki protein organomercuri liase (MerB), yang mengkatalisis ikatan merkuri-karbon untuk menghasilkan garam tiol dan senyawa organik. Bakteri yang memiliki kedua protein ini disebut sebagai bakteri resisten merkuri spektrum luas (Suryani, 2011).

Kemampuan Bioremediasi Logam Merkuri dalam Air Limbah Laboratorium

Logam merkuri dalam limbah laboratorium dapat direduksi oleh bakteri *B. cereus*, *P. aeruginosa* dan konsorsium. Hasil reduksi

merkuri dalam air limbah laboratorium dapat dilihat pada Table 7.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bakteri *B. cereus* dan *P. aeruginosa* efektif dalam menurunkan kadar logam berat Hg. Bakteri *B. cereus* dapat mereduksi limbah yang tercemar Hg sebesar 65,71 %; bakteri *P. aeruginosa* dapat mereduksi Hg sebesar 72,65 %; dan bakteri konsorsium dapat mereduksi Hg sebesar 73,47 %. Bakteri *P. aeruginosa* (Gram-negatif) dapat menurunkan kadar merkuri lebih tinggi dibandingkan dengan *B. cereus* (Gram-positif). Bakteri Gram-negatif *Pseudomonas* sp. memiliki kemampuan untuk menjadi agen bioremediasi logam berat merkuri karena lebih toleran daripada bakteri Gram-positif dan memiliki kompleksitas struktur dinding sel yang memungkinkan bakteri untuk mengikat ion logam (Suryani, 2011). Gen *Pseudomonas* sp. yang tahan terhadap merkuri disebut mer operon (Khastini et al., 2022). Gen ini melakukan reduksi enzimatis untuk mengubah ion merkuri yang beracun (Hg²⁺) menjadi bentuk merkuri yang mudah menguap (Hg⁰).

Gen tersebut berfungsi untuk mengurangi ion merkuri yang beracun (Hg²⁺) menjadi bentuk merkuri yang mudah menguap, Hg⁰, melalui proses reduksi enzimatis (Sihombing et al., 2024). Kemampuan *P. aeruginosa* dalam menurunkan kadar Hg yang lebih tinggi dibandingkan dengan *B. cereus* diduga dipengaruhi oleh karakteristik permukaan sel bakteri Gram-negatif serta kemampuannya membentuk biofilm yang kaya akan eksopolisakarida (EPS). Permukaan sel dan matriks EPS menyediakan berbagai gugus fungsi, seperti karboksil, hidroksil, fosfat, dan amino, yang berperan sebagai situs pengikatan ion logam melalui mekanisme biosorpsi. Selain itu, EPS mampu mengimobilisasi ion logam melalui adsorpsi, kompleksasi, dan flokulasi sehingga menurunkan konsentrasi ion logam bebas di

sekitar sel. Mekanisme tersebut mengurangi toksisitas logam berat sekaligus meningkatkan ketahanan bakteri terhadap cekaman lingkungan, sehingga *P. aeruginosa* memiliki potensi yang lebih tinggi dalam proses bioremediasi merkuri dibandingkan dengan bakteri yang menghasilkan EPS dalam jumlah lebih rendah (Balíková et al., 2022).

Penurunan kadar merkuri tertinggi diperoleh pada perlakuan konsorsium, hal ini menunjukkan adanya interaksi antara *B. cereus* dan *P. aeruginosa*. Pada konsorsium bakteri, masing-masing bakteri dapat menjalankan mekanisme penurunan kadar Hg yang saling melengkapi sehingga kapasitas penjerapan dan reduksi merkuri meningkat dibandingkan dengan kultur tunggal. Efektivitas konsorsium sangat dipengaruhi oleh kompatibilitas antarspesies, rasio inokulum, kondisi lingkungan, pH, suhu, dan konsentrasi logam yang digunakan (Alabssawy & Hashem, 2024).

Menurut Isa & Retnowati (2014), mekanisme transformasi merkuri oleh bakteri resisten meliputi beberapa proses biokimia, yaitu reduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 , metilasi Hg^{2+} menjadi metilmerkuri (MeHg), serta demetilasi senyawa organomercuri menjadi Hg^{2+} yang selanjutnya direduksi menjadi Hg^0 . Proses detoksifikasi merkuri pada bakteri resisten berlangsung melalui mekanisme reduksi ion merkuri dan degradasi senyawa organomercuri yang dikendalikan oleh operon mer. Pada bakteri resisten, reduksi ion merkuri dan degradasi organomercuri dikendalikan oleh operon mer. Protein transpor MerP, MerT, dan MerC mengangkut Hg^{2+} ke dalam sitoplasma, kemudian enzim merkuri reduktase (MerA) mereduksi Hg^{2+} menjadi merkuri elemental (Hg^0) dengan bantuan NADPH. Merkuri elemental yang bersifat volatil selanjutnya dilepaskan dari sel sehingga menurunkan toksisitas merkuri.

Pada sistem mer operon, gen merA mengode enzim mercuric reduktase (MerA) yang mengkatalisis reduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 yang bersifat volatil sehingga dapat berdifusi keluar dari sel. Pada bakteri yang memiliki spektrum resistensi luas, gen merB mengode enzim organomercuric lyase yang memutus ikatan karbon-merkuri pada senyawa organomercuri sehingga menghasilkan Hg^{2+} yang kemudian direduksi oleh MerA. Kombinasi aktivitas MerA dan MerB menjadikan mer operon sebagai mekanisme utama perlindungan bakteri terhadap toksisitas merkuri dan mendasari pemanfaatannya dalam teknologi bioremediasi limbah yang

terkontaminasi logam berat (Golysheva et al., 2025).

Pada penelitian ini, tingginya penurunan Hg pada perlakuan konsorsium diduga merupakan hasil kombinasi kedua mekanisme tersebut, sehingga kemampuan remediasi menjadi lebih optimal. Fenomena sinergisme dalam konsorsium bakteri telah banyak dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi bioremediasi dibandingkan dengan kultur tunggal karena adanya pembagian fungsi metabolik antarspesies (Ratnawati et al., 2010).

Limbah cair laboratorium harus memenuhi peraturan yang dapat dijadikan acuan mengenai standar logam berat Hg dalam limbah cair yang nantinya akan dialirkan ke sungai, yaitu Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Baku Mutu Air Nasional (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, 2021). Kadar merkuri (Hg) dalam air limbah laboratorium lingkungan setelah bioremediasi masih sangat tinggi, yaitu 1,3711 mg/L, dengan perlakuan terbaik, yaitu konsorsium. Jika dibandingkan dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 dengan ambang batas yang diberlakukan sebesar 0,005 mg/L dengan kategori tertinggi, yaitu kelas 4, maka sampel air limbah laboratorium lingkungan masih di atas ambang batas. Walaupun demikian, bakteri *B. cereus* dan *P. aeruginosa* berpotensi untuk menurunkan kadar Hg dalam air limbah laboratorium lingkungan.

KESIMPULAN

Angka Lempeng Total bakteri *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa* yang digunakan sebanyak $4,5 \times 10^7$ CFU/mL dan $3,4 \times 10^8$ CFU/mL. Kondisi optimum kedua bakteri dalam mereduksi kadar merkuri (Hg) yaitu pada pH 7, waktu inkubasi 96 jam, dan konsentrasi 5 mg/L. Bakteri *Bacillus cereus* dapat mereduksi merkuri (Hg) sebesar 65,71%, *Pseudomonas aeruginosa* sebesar 72,65%, sedangkan pada konsorsium bakteri, persentase yang didapat lebih tinggi, yaitu sebesar 73,45%. Tingginya persentase penurunan kadar merkuri (Hg) yang didapat menunjukkan bahwa kedua bakteri dapat mereduksi merkuri (Hg) baik secara tunggal maupun gabungan.

SARAN

Sampel air limbah laboratorium lingkungan harus diuji parameter lengkapnya sesuai Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, karena kemungkinan senyawa ionik dan anionik dalam limbah tersebut meningkat akibat metabolisme bakteri selama proses bioremediasi, sehingga air limbah laboratorium lingkungan masih belum bisa dialirkan ke sungai.

DAFTAR PUSTAKA

- Alabssawy, A. N., & Hashem, A. H. (2024). Bioremediation of Hazardous Heavy Metals by Marine Microorganisms: a Recent Review. In *Archives of Microbiology* (Vol. 206, Number 103, pp. 102–118). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03793-5>
- Amalia, A., Mayasari, U., & Nasution, R. A. (2024). Bioremediasi Merkuri (Hg) dengan Pemanfaatan Bakteri Indigenous dari Kawasan Sungai Tercemar Limbah Pertambangan Emas Batangtoru. *Spizaetus: Jurnal Biologi Dan Pendidikan Biologi*, 5(1), 110. <https://doi.org/10.55241/spibio.v5i1.350>
- Amin, A., Naveed, M., Sarwar, A., Rasheed, S., Saleem, H. G. M., Latif, Z., & Bechthold, A. (2022). In vitro and in silico Studies Reveal *Bacillus cereus* AA-18 as a Potential Candidate for Bioremediation of Mercury-Contaminated Wastewater. *Frontiers in Microbiology*, 13(847806), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.847806>
- Anaukwu, C. G., Ekwealor, C. C., Anakwenze, V. N., Orji, C. C., Ogbukagu, C. M., Anyaoha, V. I., Isiaka, A. B., Green, S. J., & Ekwealor, I. A. (2024). Heavy Metal Application of Response Surface Optimized-Lipopeptide Biosurfactant Produced by *Pseudomonas aeruginosa* Strain CGA-02 in Low-Cost Substrate. *Discover Applied Sciences*, 6(252), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05821-5>
- Anggraini, N., Agustina, T. E., & Hadiah, F. (2022). Pengaruh pH dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, dan Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345–355. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355>
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 6989.78:2011. Air dan air limbah-Bagian 78: Cara uji raksa (Hg) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-uap dingin atau Mercury Analyzer*. www.bsn.go.id
- Badan Standarisasi Nasional. (2008). *SNI 6989.59:2008 Air dan Air Limbah-Bagian 59: Metode Pengambilan Contoh Air Limbah*. In *SNI 6989.59:2008*.
- Bagia, M., Setiani, O., Rahatjo, M., Joko, T., & Darundiati, Y. H. (2023). Hubungan Paparan Merkuri Dengan Gejala Neurologis Pada Penambang Emas Tradisional Di Kecamatan Mantikulore Kota Palu. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(2), 142–151. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.2.142-151>
- Balíková, K., Vojtková, H., Duborská, E., Kim, H., Matúš, P., & Urik, M. (2022). Role of Exopolysaccharides of *Pseudomonas* in Heavy Metal Removal and Other Remediation Strategies. *Polymers*, 14(20), 1–13. <https://doi.org/10.3390/polym14204253>
- de Mattos D'Avila, D. G., Ferrari, R. G., de Almeida Rodrigues, P., Neves, G. L., Ramos Filho, A. M., Baptista Mano, R. F., & Conte Junior, C. A. (2024). Bacterial Resistance to Mercury: A Mini-Review. In *Applied Microbiology* (Vol. 4, Number 4, pp. 1630–1641). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4040111>
- Golysheva, A. A., Litvinenko, L. V., & Ivshina, I. B. (2025). Diversity of Mercury-Tolerant Microorganisms. *Microorganisms*, 13(1350), 1–28. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13061350>
- González-Reguero D, Robas-Mora, M., Probanza Lobo, A., & Jiménez Gómez P. A. (2023). Bioremediation of Environments Contaminated with Mercury. Present and Perspectives. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(9), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03686-1>

- Idris, M., Amelia Nasution, R., & Mayasari, U. (2023). Isolation of Bacteria as a Bioremediation Agent for Reclamation of Mercury-Contaminated Soils. *Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia*, 10(1), 1–11.
<http://ejurnal.bppt.go.id/index.php/JBBI>
- Isa, I., & Retnowati, Y. (2014). *Pemanfaatan Berbagai Jenis Bakteri dalam Proses Bioleaching Limbah Logam Berat*.
- ISO 4833-1. (2013). *Microbiology of Food Chain Horizontal Method for the Enumeration of Microorganisms*.
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/Webwww.iso.orghttps://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/>
- Khastini, R. O., Zahranie, L. R., Rozma, R. A., & Saputri, Y. A. (2022). Review : Peranan Bakteri Pendeградasi Senyawa Pencemar Lingkungan melalui Proses Bioremediasi. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*, 10(1), 345.
<https://doi.org/10.33394/bioscientist.v10i1.4836>
- Nnaji, N. D., Onyeaka, H., Miri, T., & Ugwa, C. (2023). Bioaccumulation for Heavy Metal Removal: a Review. In *SN Applied Sciences* (Vol. 5, Number 5, pp. 1–12). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>
- Nurhayati, I., & Sugito, P. A. (2018). Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Adsorpsi dan Pretreatment Netralisasi dan Koagulasi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 10(2), 125–138.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021). *Indonesia*.
- Pereira-García, C., del Amo, E. H., Vigués, N., Rey-Velasco, X., Rincón-Tomás, B., Pérez-Cruz, C., Sanz-Sáez, I., Hu, H., Bertilsson, S., Pannier, A., Soltmann, U., Sánchez, P., Acinas, S. G., Bravo, A. G., Alonso-Sáez, L., & Sánchez, O. (2024). Unmasking the Physiology of Mercury Detoxifying Bacteria from Polluted Sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 467(133685), 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133685>
- Pramesti, A. R., Mustika, S., Habibah, N., Puspitarini, S., Serlie, M., Roka Aji, O., Sains dan Teknologi Terapan, F., Ahmad Dahlan Jl Jendral Ahmad Yani Tamanan, U., & Daerah Istimewa Yogyakarta, B. (2019). Mikroorganisme Sebagai Agen Bioremediasi Limbah Merkuri (Hg) Penambangan Emas. *Prosiding Symbion (Symposium on Biology Education)*, 32–37.
- Ratnawati, E., Ermawati, R., & Naimah, S. (2010). Teknologi Biosorpsi oleh Mikroorganisme, Solusi Alternatif untuk Mengurangi Pencemaran Logam Berat. *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 32(1), 34–40.
- Sihombing, D., Nainggolan, R. C., Simamora Yessi Desmawati, Irawati, W., Simamora, Y. D., Irawati, W., & Artikel, I. (2024). Analisis Kemampuan Gen MerB pada Bakteri Pseudomonas sp sebagai Agen Bioremediasi Lingkungan Cemar Logam Berat Merkuri (Hg). *BioActive: Jurnal Ilmu Pendidikan Biologi*, 1(1), 11–19.
- Suryani, Y. (2011). Bioremediasi Limbah Merkuri dengan Menggunakan Mikroba pada Lingkungan yang Tercemar. *Jurnal IsTek*, 5(147), 139.