



BioActive: Jurnal Ilmiah Pendidikan Biologi

ISSN xx (online), ISSN xx (print)

Volume I, Nomor 1, Tahun 2024, Hal. 11-19

Available online at:

<https://ojs.uph.edu/index.php/BioActive/index>



Research Article



Analisis Kemampuan Gen MerB Pada Bakteri *Pseudomonas* sp. Sebagai Agen Bioremediasi Lingkungan Cemar Logam Berat Merkuri (Hg)

Analysis of The Ability MerB gene in Bacterium Pseudomonas sp. As an Environmental Bioremediation Agent Contaminate Heavy Metal Mercury (Hg)

Desi Sihombing, Rut Cindi Nainggolan, Yessi Desmawati Simamora, Wahyu Irawati*

Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Pelita Harapan, Tangerang, Indonesia

e-mail author korespondensi: wahyu.irawati@uph.edu

Informasi Artikel	ABSTRACT
Submit: 30-07-2023 Diterima: 10-06-2024 Dipublikasikan: 15-07-2024	<p><i>The presence of Mercury increases and persists in the environment resulting in harmful accumulation for organisms and causing disease. Pseudomonas</i> sp. is a gram-negative bacterium that has the metabolic ability to decompose environmental conditions polluted by mercury. The role of <i>Pseudomonas</i> sp. involves the merB gene as a polluted mercury (Hg) bioremediation agent. The aims of the study were to explain the urgency of the high environment polluted by the heavy metal mercury, to explain the resistance characteristics of <i>Pseudomonas</i> sp., to explain how MerB works, to explain the role of MerB as bioremediation of mercury contamination, and to explain the advantages and disadvantages of <i>Pseudomonas</i> sp. bioremediation. The research method uses literature study. Data were analyzed by descriptive qualitative. The results showed that the high urgency of high mercury polluted environment and damage to the environment. Mercury polluted environment requires <i>Pseudomonas</i> sp. because it has MerB protein which can catalyze the decomposition of organomercury compounds, namely methylmercury (MeHg). Mechanism of action of <i>Pseudomonas</i> sp. by utilizing the mercury-resistant operon gene. The advantages of <i>Pseudomonas</i> sp. which has the ability of efficient bioremediation to reduce mercury contamination. Lack of <i>Pseudomonas</i> sp. which requires a large amount to reduce environmental mercury pollution. Harapan <i>Pseudomonas</i> sp. can reduce environmental pollution of mercury for organisms and the environment on a larger scale. <i>Pseudomonas</i> sp. first grown to increase the bacterial isolates that benefit the environment.</p> <p>Key words: bioremediation, environment, methyl-mercury, MerB, <i>Pseudomonas</i> sp.</p>
Penerbit	ABSTRAK
Program Studi Pendidikan Biologi FIP Universitas Pelita Harapan, Tangerang - Indonesia	<p>Keberadaan Merkuri meningkat dan bertahan di lingkungan mengakibatkan akumulasi berbahaya bagi organisme dan menimbulkan penyakit. <i>Pseudomonas</i> sp. merupakan bakteri gram negatif yang memiliki kemampuan metabolisme untuk menguraikan kondisi lingkungan cemar merkuri. Peranan <i>Pseudomonas</i> sp. melibatkan gen merB sebagai agen bioremediasi cemar merkuri (Hg). Tujuan penelitian yaitu menjelaskan urgensi tingginya lingkungan cemar logam berat merkuri, menjelaskan karakteristik ketahanan <i>Pseudomonas</i> sp., menjelaskan cara kerja MerB, menjelaskan peranan MerB sebagai bioremediasi cemar merkuri, serta menjelaskan kelebihan dan kelemahan bioremediasi <i>Pseudomonas</i> sp. Metode penelitian menggunakan studi literatur. Data dianalisis secara deskriptif kualitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa urgensi tingginya lingkungan cemar merkuri tinggi dan</p>



merusak lingkungan. Lingkungan cemar merkuri membutuhkan *Pseudomonas* sp. karena memiliki protein MerB yang dapat mengkatalisis penguraian senyawa organomercuri yaitu metilmerkuri (MeHg). Mekanisme cara kerja *Pseudomonas* sp. yaitu dengan memanfaatkan gen operon resisten merkuri. Kelebihan *Pseudomonas* sp. yaitu memiliki kemampuan bioremediasi yang efisien untuk mengurangi cemar merkuri. Kekurangan *Pseudomonas* sp. yaitu membutuhkan jumlah isolat bakteri yang besar untuk mengurangi cemar merkuri lingkungan. Harapan *Pseudomonas* sp. dapat mengurangi lingkungan cemar merkuri bagi organisme dan lingkungan dalam skala yang lebih besar. *Pseudomonas* sp. terlebih dahulu ditumbuhkan untuk mempebanyak isolat-isolat bakteri yang menguntungkan lingkungan.

Kata kunci: bioremediasi, lingkungan, metil-merkuri, MerB, *Pseudomonas* sp.



This BioActive : Jurnal Ilmiah Pendidikan Biologi is licensed under a [CC BY-NC-SA \(Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

PENDAHULUAN

Lingkungan tercemar logam berat menjadi masalah serius yang perlu diperhatikan masyarakat karena berdampak negatif bagi kesehatan makhluk hidup, ekosistem, dan sumber daya alam (Rahmatina & Titah, 2022). Salah satu jenis logam berat yang paling banyak ditemukan di lingkungan tercemar adalah merkuri (Hg). Merkuri secara alami berasal dari alam dan dari aktivitas masyarakat (Marlina et al., 2021). Merkuri secara alami memiliki jumlah yang sedikit sehingga tidak berbahaya bagi lingkungan. Merkuri yang berasal dari aktivitas masyarakat bersifat berbahaya karena menghasilkan jumlah yang banyak. Merkuri yang dihasilkan dari aktivitas masyarakat berasal dari limbah pertambangan emas, pabrik kimia, pabrik semen, pabrik elektronik, limbah medis, serta limbah domestik (Adhani & Husaini, 2017). Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa limbah pertambangan emas di beberapa wilayah Sulawesi mengandung merkuri langsung dibuang ke lingkungan sekitar (Kepel et al., 2012). Aktivitas masyarakat yang tidak bertanggung jawab dalam pengelolaan limbah merkuri menghasilkan kerugian bagi lingkungan sekitar.

Merkuri merupakan salah satu jenis logam berat berbahaya karena mengandung racun (Hindratmo et al., 2019). Metabolisme tubuh manusia dapat terganggu jika merkuri masuk dalam jumlah yang sedikit, atau banyak. Keberadaan merkuri di dalam tubuh manusia mengganggu sistem kerja saraf, perkembangan janin, fungsi paru-paru, pendengaran, dan berisiko terjadinya gagal ginjal. (Lamakarate et al., 2022). Racun merkuri dapat menyebabkan kerusakan otak manusia sehingga keberadaan merkuri di lingkungan sangat berbahaya (Pramesti et al., 2019). Keberadaan merkuri di dalam tanah menyebabkan perubahan struktur tanah dan tanaman mengakumulasi merkuri (Zulfikah et al., 2014). Merkuri yang terdapat di dalam perairan memiliki laju bioakumulasi lebih tinggi dibandingkan dengan logam berat lainnya (Bernadus et al., 2021). Keberadaan merkuri di lingkungan perairan juga berpotensi menyebabkan perubahan struktur komunitas biota air. Perubahan struktur komunitas biota air karena kematian mikroorganisme, organisme mengalami resistensi terhadap paparan zat kimia dan kualitas perairan mengalami perubahan akibat paparan merkuri (Bernadus et al., 2021).

Merkuri dapat mengikat bahan organik sehingga mudah mengendap di dasar perairan atau di tanah (Ismail et al., 2020). Merkuri yang masuk ke dalam perairan mengalami proses pengendapan, pengenceran, dan penguraian (Ishak, 2017). Merkuri yang mengendap di dasar perairan menimbulkan reaksi aktivitas mikroorganisme membentuk metil-merkuri (Me-Hg). Metil merkuri bersifat racun dan

memiliki daya ikat yang kuat dengan organisme yang hidup di perairan. Merkuri terakumulasi di dalam tubuh ikan dan dikonsumsi masyarakat mengakibatkan penyebaran merkuri lanjut ke tubuh manusia. Inswiasri (2008) dalam penelitian yang dilakukan mengatakan bahwa manusia dapat terkontaminasi merkuri melalui ikan yang dikonsumsi. Metil-merkuri yang masuk ke dalam tubuh sangat berbahaya bagi kesehatan manusia (Agustina, 2014). Masyarakat penting menjaga perairan dari pencemaran merkuri untuk mendapatkan hasil alam yang lebih sehat.

Jumlah merkuri dalam lingkungan dapat berkurang melalui bioremediasi yang dilakukan oleh mikroorganisme atau makroorganisme (Pramesti, et al., 2019). Bioremediasi merupakan suatu tindakan kepada lingkungan tercemar untuk mengurangi jumlah polutan dengan memanfaatkan organisme yang memiliki daya akumulasi (Priadie, 2012). Bioremediasi dapat menggunakan organisme hidup yaitu bakteri, jamur, dan tumbuhan. Organisme yang mampu mengakumulasi merkuri bertujuan untuk menghilangkan, mereduksi, atau mengubah lingkungan tercemar menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau tidak berbahaya (Suryani, 2011). Penelitian ini mengkaji bioremediasi yang melibatkan *Pseudomonas* sp..

Pseudomonas sp. merupakan bakteri gram negatif yang memiliki kemampuan metabolik yang luas dan dapat menguraikan kondisi lingkungan yang ekstrem. *Pseudomonas* sp. dapat bertahan dan aktif dalam berbagai lingkungan yang terkontaminasi merkuri (Suyono & Salahudin, 2011). *Pseudomonas* sp. memiliki gen MerB yang digunakan untuk mengatasi keracunan merkuri dalam lingkungan. MerB merupakan gen yang mengkodekan enzim MerB yang berfungsi sebagai sistem resitensi merkuri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa enzim MerB berperan dalam bioremediasi merkuri untuk mengkatalisis merkuri organik yaitu metil-merkuri (Kepel et al., 2012).

Berdasarkan uraian masalah di atas maka tujuan penelitian, yaitu menjelaskan urgensi tingginya lingkungan cemar logam berat merkuri, menjelaskan karakteristik ketahanan *Pseudomonas* sp., menjelaskan cara kerja MerB pada *Pseudomonas* sp., menjelaskan peranan gen MerB sebagai bioremediasi cemar merkuri, serta menjelaskan kelebihan dan kelemahan bioremediasi *Pseudomonas* sp.

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode studi literatur atau studi pustaka. Metode penelitian menggunakan studi literatur dapat dilakukan dengan cara memahami dan mempelajari teori-teori dari berbagai literatur sesuai topik penelitian yang dikaji (Adlini et al., 2022). Pengambilan sumber informasi melalui artikel jurnal, e-book, laporan penelitian, dan situs web tervalidasi baik dalam bidang biologi lingkungan dan kesehatan. Data dianalisis secara deskriptif kualitatif dengan berfokus pada data informasi pencemaran lingkungan merkuri dan bioremediasi *Pseudomonas* sp.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Urgensi Tingginya Lingkungan Tercemar Logam Berat Merkuri

Data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2021 mencatat terdapat 10.683 desa/kelurahan yang mengalami pencemaran air, 1499 desa/kelurahan yang mengalami pencemaran tanah, serta 5644 desa/kelurahan yang mengalami pencemaran udara. Pencemaran lingkungan terjadi penimbunan logam berat di dalam tanah atau perairan. Pencemaran logam berat menimbulkan berbagai jenis penyakit dan berisiko merusak ekosistem. Logam berat memiliki sifat yang stabil, sulit terurai, dan beracun bagi

mahluk hidup (Nurbarasamuma et al., 2022). Jenis logam berat yaitu Hg, Cd, Pb, Ag, Cr dan Zn. Merkuri (Hg) bersifat gas yang dapat mengembun di udara dan bersifat garam merkuri organik yang beracun bagi mahluk hidup (Hadi, 2013). Merkuri berasal dari limbah pertambangan emas, pabrik kimia, pabrik semen, pabrik elektronik, limbah medis, serta limbah domestik masyarakat (Adhani & Husaini, 2017).

Merkuri yang bersifat gas dapat menyebar melalui air hujan. Penyebaran merkuri menyebabkan keracunan bagi organisme yang bersentuhan dengan hujan merkuri. Merkuri dapat mengendap dalam tubuh melalui makanan yang dikonsumsi dari tumbuhan atau hewan (Ridhowati, 2013). Penyebaran merkuri juga dapat disebabkan karena limbah pertambangan yang langsung dibuang ke lingkungan sekitar masyarakat (Kepel et al., 2012). Pratiwi dan Ariesyady (2014) mengatakan penyebaran merkuri ke ekosistem karena terbawa aliran air persawahan. Hal ini menyebabkan tumbuhan dan hewan mengalami akumulasi merkuri di dalam tubuh.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2012) mengatakan bahwa bahaya merkuri bagi manusia berbentuk metil-merkuri. Senyawa metil-merkuri yang masuk ke dalam tubuh terakumulasi di dalam ginjal, otak, dan hati sehingga dapat menyebabkan kanker dan kematian (Heruwati et al., 2005). Kasus kematian yang disebabkan merkuri belum pernah di data di Indonesia sehingga studi tentang toksisitas merkuri tidak banyak diketahui oleh masyarakat. Masyarakat penting membatasi penggunaan merkuri dalam berbagai industri pertambangan. Masyarakat dapat melakukan pertambangan tertutup supaya mengurangi jumlah keluarnya merkuri ke lingkungan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012).

Karakteristik ketahanan *Pseudomonas* sp. Sebagai Bioremediasi Logam Berat Merkuri

Bioremediasi merupakan proses penguraian lingkungan tercemar untuk mengurangi atau menghilangkan polutan yang berbahaya (Suryani, 2011). Proses bioremediasi dipengaruhi oleh interaksi antara enzim pengkatalis reaksi yang dikeluarkan bakteri dengan limbah pencemar yang berasal dari lingkungan itu sendiri (Sutanto, 2014). Bakteri sebagai agen bioremediasi memiliki mekanisme khusus untuk mendegradasi logam berat. Kemampuan bakteri sebagai bioremediasi karena memiliki dinding sel yang mampu mengikat ion dari logam berat untuk mendapatkan energi (Khastini et al., 2022). *Pseudomonas* sp. dapat dijadikan sebagai bioremediasi lingkungan tercemar merkuri karena memiliki dinding sel yang mampu mengakumulasi logam berat. Ion positif dari logam berat secara elektrostatis terikat dengan permukaan sel *Pseudomonas* sp. (Oktavia & Sumardi, 2022).

Pseudomonas sp. merupakan bakteri aerob obligat yang memiliki kapsul dan flagela untuk membantu pergerakan bakteri (Anggraeni & Triajie, 2021). *Pseudomonas* sp. merupakan bakteri gram negatif yang mampu menjadi agen bioremediasi logam berat merkuri karena bersifat toleran dibandingkan bakteri gram positif. Bakteri gram negatif memiliki kekompleksan struktur dinding sel sehingga ion logam mampu diikat oleh bakteri (Suryani, 2011). *Pseudomonas* sp memiliki gen resisten merkuri yang dikenal sebagai mer operon (Khastini et al., 2022). Mer operon mengandung gen yang mampu menyandikan protein regulasi dan protein fungsional yaitu merT dan merP untuk transport, merA untuk mereduksi, serta mer B atau *organomercury lyase* untuk mereduksi merkuri organik (Neneng et al., 2020). Hasil penelitian yang dilakukan Sutanto et al (2018) membuktikan bahwa *Pseudomonas* sp. mengandung gen yang resisten pada merkuri, khususnya resisten terhadap metil-merkuri, fenil-merkuri dan garam merkuri anorganik.

Cara kerja gen MerB pada bakteri *Pseudomonas* sp. sebagai bioremediasi logam berat Merkuri

Penyebab ketahanan *Pseudomonas* sp. terhadap merkuri bergantung pada kumpulan gen operon resisten merkuri. Gen pada *Pseudomonas* sp. berfungsi untuk mengurangi ion merkuri yang beracun (Hg^{2+}) menjadi bentuk merkuri yang mudah menguap Hg^0 melalui proses reduksi enzimatik. Operon ini mengandung gen yang mengkodekan protein fungsional untuk regulasi (*merR*), transport (*merT*, *merP*) dan reduksi (*merB*). *MerB* bertanggung jawab untuk mereduksi merkuri organik (Neneng et al., 2020). Tahapan cara kerja *merB* pada *Pseudomonas* sp. sebagai bioremediasi lingkungan tercemar merkuri yaitu:

Analisis dan Amplifikasi GenS rRNA

Bahan isolasi untuk mengidentifikasi bakteri resisten merkuri organik dalam media *Nutrient Broth* mengandung fenil merkuri diambil dari lapisan tanah pertambangan emas. Isolat bakteri yang tumbuh dengan baik pada setiap titik pengambilan dilakukan pengecekan morfologi yaitu dengan pewarnaan gram. Selanjutnya dilakukan amplifikasi PCR dan analisis gen 16S rRNA. Amplifikasi gen 16S rRNA menggunakan molekul RNA kecil yang terdapat pada ribosom bakteri. Aplikasi gen 16S rRNA adalah untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan bakteri berdasarkan perbedaan urutan basa pada molekul 16S rRNA (Noer, 2021). Metode ini disebut sebagai analisis filogenetik 16S rRNA dan telah menjadi alat standar untuk mengidentifikasi dan membandingkan bakteri dalam penelitian mikrobiologi. Analisis filogenetik 16S rRNA memanfaatkan variasi urutan basa pada molekul 16S rRNA dari berbagai jenis bakteri untuk membangun pohon evolusi yang menunjukkan hubungan filogenetik bakteri (Noer, 2021).

Pohon evolusi ini dapat memberikan informasi penting tentang sejarah evolusi bakteri dan dapat membantu dalam klasifikasi bakteri ke dalam kelompok yang berbeda berdasarkan kesamaan evolusi mereka. DNA genomik bakteri yang sudah diisolasi diamplifikasi menggunakan mesin PCR. DNA yang sudah diamplifikasi kemudian dipisahkan dengan elektroforesis gel agrosa 1%, sesuai dengan penelitian yang dilakukan (Syah, 2022). Visualisasi amplifikasi gen 16 rRNA di uji dengan elektroferesis pada gel agrosa 1%. Selanjutnya dilakukan visualisasi menggunakan pewarna etidium bromida dan dideteksi dengan sinar UV transilluminator (Kepel et al., 2012).

Amplifikasi dan Analisis Gen merB

Gen *merB* diamplifikasi dengan menggunakan primer dengan cetakan yang digunakan adalah DNA koloni bakteri. Kemudian dilakukan optimasi dengan variasi komposisi reagen dan kondisi reaksi PCR. Optimasi terhadap kondisi PCR yaitu suhu penempelan telah dilakukan berulang kali. Selanjutnya gen *merB* akan dielektroforesis dengan gel agrosa 1,5% dan divisualisasi di bawah sinar UV (Kepel et al., 2012).

Sekuensing Gen merB

Isolat bakteri *Pseudomonas* sp. yang berhasil di isolasi dan diidentifikasi. Amplifikasi gen *merB* menggunakan sekuensing PCR di laboratorium. Urutan asam amino isolat yang berhasil diidentifikasi berada pada sisi aktif protein enzim organomerkuri liase (*MerB*) pada urutan asam amino Cys96 dan Cys-159. Urutan asam amino Cys-96 dan Cys-159 ini memegang peran penting dalam pengikatan substrat, pemutusan ikatan karbon-merkuri (C-Hg), dan kontrol terhadap pelepasan produk ion merkuri hasil bioremediasi (Kepel et al., 2012).

Peranan gen MerB pada Bakteri *Pseudomonas* sp. sebagai bioremediasi lingkungan cemar logam berat merkuri

MerB merupakan salah satu gen yang dimiliki oleh bakteri untuk menguraikan senyawa organomercuri menjadi senyawa yang kurang berbahaya. *Pseudomonas* sp. adalah salah satu bakteri yang memiliki gen merB. Struktur gen merB pada *Pseudomonas* sp. umumnya terdiri dari sekitar 800 bp (*base pair*) dan mengandung informasi untuk protein MerB. Protein MerB memiliki massa molekul sekitar 24 kDa dan terdiri dari 214 asam amino. Protein MerB berperan dalam mengkatalisis penguraian senyawa organomercuri seperti metilmerkuri (MeHg) menjadi Hg^{2+} dan HgO (Kepel et al., 2012). Peran merB pada *Pseudomonas* sp. adalah untuk bioremediasi logam berat. Bakteri *Pseudomonas* sp. dapat dimanfaatkan untuk membersihkan lingkungan yang terkontaminasi senyawa organomercuri, seperti pada limbah industri atau limbah pertanian. MerB mampu membuat tanaman dapat mentoleransi Hg yang tinggi sehingga memiliki proses pertumbuhan menjadi baik. Hal ini disebabkan karena MerB memiliki aktivitas protonilisis untuk merubah merkuri Hg menjadi Hg^{2+} yang dapat dirubah oleh MerA menjadi Hg⁰ yang dapat menguap dari tanaman (Said, 2018).

Kelebihan dan Kelemahan Bioremediasi *Pseudomonas* sp. Sebagai Bioremediasi Merkuri

Bioremediasi memiliki kelebihan dan kelemahan dalam proses pengaplikasian di lingkungan. Kelebihan bioremediasi menggunakan *Pseudomonas* sp. yaitu mampu mengurangi kandungan logam berat dalam lingkungan yang telah tercemar merkuri. *Pseudomonas* sp. mampu mengkatalisis merkuri berbahaya menjadi tidak berbahaya. *Pseudomonas* sp memiliki ion yang dapat mengubah ion berbahaya dari merkuri anorganik menjadi lebih rendah (Lutfi et al., 2018). Kelebihan lain dari bioremediasi merkuri menggunakan *Pseudomonas* sp. yaitu mampu membersihkan lingkungan yang sebelumnya telah terkontaminasi senyawa organomercuri pada limbah pertanian sehingga dapat digunakan kembali. Kelebihan bioremediasi yaitu tidak menggunakan bahan kimia berbahaya dan hanya menggunakan mikroorganisme sehingga tetap ramah lingkungan. *Pseudomonas* sp. merupakan bakteri indigenous yang tidak mencemari lingkungan.

Kelemahan bioremediasi logam berat merkuri dengan menggunakan bakteri *Pseudomonas* sp yaitu kesulitan mengontrol kondisi lingkungan cemar merkuri supaya bakteri tetap bekerja secara optimal. Peneliti harus memperhatikan kondisi fisiokimia ataupun sistem enzimatik bakteri sehingga mengoptimalkan aktifasi metabolisme dalam proses bioremediasi. Proses bioremediasi bergantung pada aktivitas dari bakteri (Ismail et al., 2020). Kelemahan lain dari penggunaan *Pseudomonas* sp sebagai agen bioremediasi logam berat merkuri yaitu mengalami pertumbuhan yang lambat atau mati pada konsentrasi merkuri yang tinggi. *Pseudomonas* sp mampu mengakumulasi merkuri dalam jumlah konsentrasi yang terbatas (Sutanto et al., 2018). Akan tetapi, disamping kelebihan dan kelemahan yang dimiliki, penggunaan bakteri tersebut sebagai agen bioremediasi sangat bermanfaat dan penting untuk mengurangi pencemaran lingkungan merkuri.

SIMPULAN

Pencemaran lingkungan merkuri di Indonesia tinggi disebabkan karena banyaknya aktivitas masyarakat menggunakan merkuri pada pertambangan, pabrik industri, limbah medis, dan limbah domestik. Limbah merkuri langsung dibuang di lingkungan sekitar sehingga merusak tatanan lingkungan dan menimbulkan penyakit. *Pseudomonas* sp. menghasilkan gen MerB untuk mengkatalisis penguraian

senyawa metilmerkuri yang bersifat racun. Kelebihan *Pseudomonas* sp mampu mengurangi atau membersihkan lingkungan tercemar merkuri. Kekurangan *Pseudomonas* sp. membutuhkan jumlah isolate bakteri yang banyak untuk efektif bekerja dalam mengkatalisis merkuri.

Penulis merefleksikan bahwa bakteri sebagai makhluk ciptaan Tuhan yang mikroskopis memiliki manfaat yang luar biasa untuk mengurangi pencemaran lingkungan merkuri. Bakteri yang kecil memiliki karakteristik ataupun struktur yang membantu bakteri dalam mengakumulasi logam berat yang berbahaya. Allah sebagai pencipta menciptakan semua ciptaan memiliki tujuan dan manfaat bagi lingkungan. Penulis semakin diingatkan untuk mampu mengelola lingkungan dengan baik.

REFERENSI

- Adhani, R., & Husaini. (2017). *Logam Berat Sekitar Manusia* (S. Kholishotunnisa (ed.); 2 ed., Nomor 1). Lambung Mangkurat University Press.
- Adlini, M. N., Dinda, A. H., Yulinda, S., Chotimah, O., & Merliyana, S. J. (2022). Metode Penelitian Kualitatif Studi Pustaka. *Edumaspul: Jurnal Pendidikan*, 6(1), 974–980. <https://doi.org/10.33487/edumaspul.v6i1.3394>
- Agustina, T. (2014). Kontaminasi Logam Berat Pada Makanan dan Dampaknya Pada Kesehatan. *Teknobuga*, 1(1), 53–65. <https://doi.org/10.15294/teknobuga.v1i1.6405>
- Anggraeni, A., & Triajie, H. (2021). Uji Kemampuan (*Pseudomonas aeruginosa*) Dalam Proses Biodegradasi Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb), di Perairan Timur Kamal Kabupaten Bangkalan. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 2(3), 176–185. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v2i3.11754>
- Bernadus, G. E., Polii, B., & Rorong, J. A. (2021). Dampak Merkuri Terhadap Lingkungan Perairan Sekitar Lokasi Pertambangan Di Kecamatan Loloda Kabupaten Halmahera Barat Provinsi Maluku Utara. *Jurnal Transdisiplin Pertanian (Budidaya Tanaman, Perkebunan, Kehutanan, Peternakan, Perikanan), Sosial dan Ekonomi*, 12(5), 599–610. <https://doi.org/10.35791/agrsosek.17.2%20MDK.2021.35429>
- Hadi, M. C. (2013). Bahaya Merkuri di Lingkungan Kita. *Jurnal Skala Husada*, 10(2), 175–183.
- Heruwati, E. S., Murtini, J. T., & Ma'ruf, W. F. (2005). *Kebijakan Riset Dalam Penanggulangan Pencemara Pesisir Indonesia* (hal. 7–12). BRIN.
- Hindratmo, B., Masitoh, S., Kusumardhani, M., & Junaedi, E. (2019). Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg) Pada Area Bekas Penambangan Emas Sekala Kecil (PESK): Studi Kasus di Gunung Botak, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku. *Ecolab*, 13(2), 127–132. <https://doi.org/10.20886/jklh.2019.13.2.124-129>
- Inswiasri. (2008). Paradigma Kejadian Penyakit Pajanan Merkuri (Hg). In *Jurnal Ekologi Kesehatan* (Vol. 7, Nomor 2, hal. 775–785).
- Ishak, N. I. (2017). Analisis Risiko Lingkungan Logam Berat Merkuri Pada Sedimen Laut di Wilayah Pesisir Kota Makassar. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 7(2), 88–

92. <https://media.neliti.com/media/publications/223822-risk-analysis-of-heavy-metal-weight-merc.pdf>

- Ismail, I., Mangesa, R., & Irsan, I. (2020). Bioakumulasi Logam Berat Merkuri (Hg) Pada Mangrove Jenis *Rhizophora Mucronata* Di Teluk Kayeli Kabupaten Buru. *Biosel: Biology Science and Education*, 9(2), 139. <https://doi.org/10.33477/bs.v9i2.1637>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2012). *Pencemaran Merkuri Dari Darat ke Laut*. Kementerian ESDM. <https://www.minerba.esdm.go.id/berita/minerba/detil/20121013-pencemaran-merkuri-dari-darat-ke-laut>
- Kepel, B. J., Yusuf, I., Natsir, R., & Badaruddin, F. (2012). Isolasi dan Karakterisasi Gen merB pada Bakteri *Pseudomonas* sp. Sebagai Gen Resistensi Merkuri Organik. *Jurnal Kedokteran Yarsi*, 20(2), 69–080. <https://doi.org/10.33476/jky.v20i2.161>
- Khastini, R. O., Zahranie, L. R., Rozma, R. A., & Saputri, Y. A. (2022). Review : Peranan Bakteri Pendegradasi Senyawa Pencemar Lingkungan melalui Proses Bioremediasi. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 10(1), 345. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v10i1.4836>
- Lamakarate, S., Banne, Y., Nahor, E., Wullur, A., Rintjap, D., & Sapiun, Z. (2022). Gangguan Kesehatan Akibat Merkuri Dalam Kosmetika. *Jurnal Poltekkes Kemenkes Manado*, 1(2), 505–517. <https://ejournal.poltekkes-manado.ac.id/index.php/eprosiding2022/article/view/1709>
- Lutfi, S. R., Wignyanto, ignyanto, & Kurniati, E. (2018). Bioremediasi Merkuri Menggunakan Bakteri Indigenous Dari Limbah Penambangan Emas Di Tumpang Pitu, Banyuwangi. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 19(1), 15–24. <https://doi.org/10.21776/ub.jtp.2018.019.01.2>
- Marlina, Nurmalahayati, Kadir, Y. A., Iqhrammullah, M., Saiful, Thanthawi, I., & Farida, M. (2021). *Penyusun Menyikapi Merkuri Dengan Lebih Bijak*. Bandar Publishing.
- Neneng, L., Ardianoor, A., Usup, H. L. D., Adam, C., Zakaria, Z., Ghazella, A., Perangin-angin, S. B., & Alvianita, V. (2020). Potensi *Chlorella* sp. dan *Pseudomonas* sp. dari Areal Tambang Emas sebagai Mikroorganisme Potensial Pereduksi Merkuri. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 617–625. <https://doi.org/10.14710/jil.18.3.617-625>
- Noer, S. (2021). Identifikasi Bakteri secara Molekular Menggunakan 16S rRNA. *EduBiologia: Biological Science and Education Journal*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.30998/edubiologia.v1i1.8596>
- Nurbarasamuma, Chaerul, M., Anshari, E., & Deniyatno. (2022). Pencemaran Logam Berat Hg, As, Cd Di Sedimen Sungai Langkowala Akibat Aktivitas Penambangan Kabupaten Bombana Sulawesi Tenggara. *Jurnal Lingkungan Almuslim*, 1(1), 01–07. <https://doi.org/10.51179/jla.v1i1.941>
- Oktavia, R., & Sumardi, S. (2022). Kemampuan *Bacillus* sp. Sebagai Bioremediasi Bahan Pencemar. *Jurnal Bioterdidik: Wahana Ekspresi Ilmiah*, 10(2), 110–125. <https://doi.org/10.23960/jbt.v10i2.23919>
- Pramesti, A. R., Mustika, S., Habibah, N., Puspitarini, S., Serlie, M., & Aji, O. R. (2019). Mikroorganisme sebagai agen bioremediasi limbah merkuri (Hg) penambangan emas. *Symposium of Biology Education (Symbion)*, 2, 32–37. <https://doi.org/10.26555/symbion.3506>

- Pratiwi, C. A., & Ariesyady, H. D. (2014). Analisis Risiko Pencemaran Merkuri Terhadap Kesehatan Manusia Yang Mengonsumsi Beras Di Sekitar Kegiatan Tambang Emas Tradisional (Studi Kasus: Desa Lebaksitu, Kecamatan Lebakgedong, Kabupaten Lebak, Banten). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 18(2), 106–114. <https://doi.org/10.5614/jtl.2012.18.2.1>
- Priadie, B. (2012). Teknik Bioremediasi Sebagai Alternatif Dalam Upaya Pengendalian Pencemaran Air. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 10(1), 38. <https://doi.org/10.14710/jil.10.1.38-48>
- Rahmatina, I. S., & Titah, H. S. (2022). Kajian Literatur Enhanced Phytoremediation pada Lahan Tercemar Logam Berat Merkuri. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2), 69–74. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2.92509>
- Ridhowati, S. (2013). *Mengenal pencemaran ragam logam* (1 ed.). Graha Ilmu.
- Said, N. I. (2018). Metoda Penghilangan Logam Merkuri Di Dalam Air Limbah Industri. *Jurnal Air Indonesia*, 6(1), 11–23. <https://doi.org/10.29122/jai.v6i1.2447>
- Suryani, Y. (2011). Bioremediasi Limbah Merkuri Dengan Menggunakan Mikroba Pada Lingkungan Yang Tercemar. *Istek*, 5(1–2), 139–148. <https://journal.uinsgd.ac.id/index.php/istek/article/view/273>
- Sutanto, A. (2014). Bioremediasi Limbah Cair Nanas. In *Metro*.
- Sutanto, S., Kepel, B. J., & Bodhi, W. (2018). Uji Resistensi Bakteri *Pseudomonas* Sp. yang Disolasi dari Plak Gigi terhadap Merkuri. *Jurnal e-Biomedik*, 6(1). <https://doi.org/10.35790/ebm.6.1.2018.18764>
- Suyono, Y., & Salahudin, F. (2011). Identifikasi dan Karakterisasi Bakteri *Pseudomonas* pada Tanah yang Terindikasi Terkontaminasi Logam. *Jurnal Biopropal Industri*, 02(01), 8–13. <https://media.neliti.com/media/publications/53262-ID-none.pdf>
- Syah, M. A. (2022). Isolasi dan Karakterisasi Molekuler Gen 16S rRNA Bakteri Lipolitik Asal Limbah Kulit Biji Jambu Mete. *Jurnal Sumberdaya Hayati*, 8(1), 20–26. <https://doi.org/10.29244/jsdh.8.1.20-26>
- Zulfikah, Basir, M., & Isrun. (2014). Konsentrasi Merkuri (Hg) dalam Tanah dan Jaringan Tanaman Kangkung (*Ipomoea reptans*) yang Diberi Bokashi Kirinyu (*Chromolaena odorata* L.) pada Limbah Tailing Penambangan Emas Poboya Kota Palu. *e-J. Agrotekbis*, 2(6), 587–595. <https://www.neliti.com/id/publications/242096/konsentrasi-merkuri-hg-dalam-tanah-dan-jaringan-tanaman-kangkung-ipomoea-reptans>.