

Isolasi dan Eksplorasi Potensi Bakteri Indigenous dari Tempat Pembuangan Akhir sebagai Agen Bioremediasi terhadap Kontaminasi Merkuri (HgCl_2)

Besse Khalidatunnisa¹, Fitha Febrilia Ruli², Sri Ayu Anggita³, Jamilatus Sa'diyah⁴

^{1,3,4} Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar

² Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin

*Corresponding author: bkhalidatunnisa@unm.ac.id

ABSTRACT

Heavy metal contamination, particularly mercury and its derivatives, represents a serious environmental issue with profound impacts on ecosystems and human health. Mercury (HgCl_2) is known to be highly toxic, persistent, and capable of bioaccumulating within the food chain. Bioremediation using indigenous bacteria offers an environmentally friendly and sustainable alternative approach. This study aimed to evaluate the diversity and adaptability of soil bacteria in response to mercury (HgCl_2) exposure at different concentrations. Soil samples were incubated with and without HgCl_2 , and the number of bacterial strains as well as their growth tolerance were analyzed. The results showed that on day 0, 14 strains were identified in soil without HgCl_2 and 15 strains in soil with HgCl_2 . After seven days of incubation, the number of strains slightly increased to 14 and 16 in soil without and with HgCl_2 , respectively. Several new strains were detected on day 7, while some present on day 0 were no longer observed in either the control or treated samples. Tolerance assays revealed that certain isolates, such as K7, P1, and P10, were able to grow at mercury concentrations up to 30 ppm, whereas others could only survive at lower concentrations. These variations in growth patterns suggest different adaptive mechanisms, including the potential role of mercury reductase enzymes in detoxification. The findings highlight the ability of soil bacterial communities to survive and adapt to mercury contamination, underscoring their potential role in the bioremediation of heavy metal-polluted environments.

Keywords: bioremediation, indigenous bacteria, mercury, HgCl_2 , landfill

PENDAHULUAN

Merkuri merupakan salah satu pencemar logam berat yang sangat berbahaya dan banyak ditemukan di lingkungan tercemar, terutama pada tempat pembuangan akhir yang merupakan lokasi akumulasi berbagai jenis sampah rumah tangga dan industri. Logam tersebut dapat masuk ke lingkungan dari sumber alami dan sumber antropogenik. Sumber emisi merkuri alamiah berasal dari pelapukan, aktivitas *geothermal* dan peristiwa letusan gunung (Gworek dkk., 2020).

Pencemaran oleh merkuri di lingkungan mengalami peningkatan yang signifikan sejak masa evolusi industri.

Merkuri yang terlepas ke lingkungan akan terakumulasi pada konsumen tingkat tinggi pada rantai makanan, sehingga berpotensi menimbulkan dampak serius bagi kesehatan, termasuk kematian organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Mikroorganisme memiliki peran penting dalam proses detoksifikasi merkuri yang berada di lingkungan. Populasi mikroba indigenous yang telah beradaptasi dan berevolusi pada suatu lokasi tercemar tertentu dapat menjadikannya sebagai agen ideal dalam proses remediasi *in-situ* (Rani dkk., 2020).

Tempat pembuangan akhir (TPA) yang merupakan tempat akumulasi sampah dan sedimen, berpotensi menjadi habitat mikroorganisme yang memiliki

kemampuan dalam mereduksi merkuri. Salah satu contoh TPA di Piyungan merupakan salah satu tempat pembuangan sampah terbesar di wilayah tersebut. Kondisi lingkungan TPA tersebut memungkinkan keberadaan bakteri indigenous yang berpotensi sebagai agen bioremediasi pencemaran merkuri.

Beberapa bakteri anaerob dan archaea mengembangkan kemampuan resistensi terhadap merkuri melalui mekanisme degradasi senyawa Hg organik maupun anorganik menjadi $Hg(0)$ dalam fase gas. Resistensi ini berkaitan dengan keberadaan enzim mercuric reductase (MerA, MerB) yang dihasilkan oleh mikroba, yang merupakan enzim utama dalam sistem detoksifikasi mikrobial terhadap merkuri (Niane dkk, 2019). Quintero dkk (2024) menyebutkan dalam penelitiannya bahwa mekanisme detoksifikasi merkuri paling luas dipelajari dan umumnya ditemukan pada bakteri gram negatif dengan *mer operon* mampu mereduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 melalui aktivitas *merA*, sehingga menghilangkan sekitar 86,9% merkuri dalam kultur.

Sistem detoksifikasi ini berperan dalam mengubah Hg^{2+} menjadi ion volatil lebih tidak berbahaya (Hg^0) dengan bantuan protein pengangkut membran seperti MerP, MerT, MerE, dan regulator MerR/MerD yang berlangsung melalui transpor ion Hg^{2+} ke dalam sitoplasma sel dengan bantuan protein transporter khusus, yaitu MerT. Melalui mekanisme tersebut, bakteri tidak hanya bertahan pada lingkungan dengan kadar merkuri tinggi, tetapi juga secara aktif dapat menurunkan tingkat toksisitas merkuri tersebut (Olaya-Abril dkk., 2024).

Hingga saat ini, para peneliti terus mengembangkan upaya dalam menangani pencemaran merkuri, khususnya di TPA. Salah satu penanganan pencemaran merkuri yang terjadi dengan melakukan bioremediasi dengan melibatkan mikroorganisme dalam mendetoksifikasi atau menghilangkan polutan yang berupa bahan berbahaya dari lingkungan (Sreedevi dkk., 2022). Salah satu upaya untuk detoksifikasi merkuri dapat dilakukan dengan menggunakan bakteri resisten merkuri yang memiliki gen resisten merkuri, *mer operon*. Mikroorganisme yang

terdapat pada daerah yang tercemar oleh merkuri, seperti bakteri indigenous yang terdapat pada TPA, umumnya tahan terhadap konsentrasi merkuri yang relatif tinggi. Apabila mikroorganisme tersebut dapat beradaptasi pada lingkungan dengan tingkat kontaminasi logam berat yang tinggi, maka diasumsikan bahwa penggunaan bakteri tersebut sangat efektif dalam meningkatkan reduksi logam berat, dalam hal ini logam berat berupa merkuri. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk mengisolasi dan mengetahui keragaman bakteri resisten merkuri dari tanah yang tercemar.

Berdasarkan uraian tersebut, eksplorasi keanekaragaman bakteri indigenous dari TPA yang memiliki kemampuan mereduksi merkuri menjadi sangat penting. Selain itu, penelitian ini juga ditujukan untuk memperoleh isolat bakteri yang berpotensi sebagai agen bioremediasi dalam mereduksi merkuri di lingkungan tercemar, sehingga dapat mendukung pengembangan strategi bioremediasi yang ramah lingkungan, efisien dan berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran merkuri di ekosistem darat maupun perairan.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Biologi, Universitas Gadjah Mada yang berlangsung pada bulan Januari hingga Februari 2020. Sampel yang digunakan berupa sampel tanah yang berasal dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan, Bantul, D.I Yogyakarta dengan kondisi yang tergenang air dengan timbunan sampah yang cukup tinggi. Sampah yang terakumulasi di TPA tersebut berasal dari berbagai sumber seperti sampah rumah tangga maupun industri. Oleh karenanya dimungkinkan bahwa di TPA tersebut tercemar merkuri.

Sampel tanah yang diambil dari TPA tersebut sebanyak 1 kg kemudian dibawa ke laboratorium untuk dilakukan isolasi bakteri indigenous. Sampel tanah dimasukkan kedalam 2 wadah yang masing-masing dibedakan dengan penambahan $HgCl_2$ dan tanpa penambahan $HgCl_2$ sebanyak 10 ppm. Penambahan $HgCl_2$ pada sampel tanah akan merubah diversitas

mikrobia tanah (Zhou dkk., 2020), sehingga mikrobial yang memiliki kemampuan tinggi dalam mendegradasi merkuri dapat terseleksi. Isolasi bakteri dilakukan pada hari ke-0 dan hari ke-7 dari dua sampel tanah yang telah diperlakukan sebelumnya. Pengenceran berseri dilakukan dari 10^{-1} hingga 10^{-6} dengan cara menambahkan 1 g sampel tanah ke dalam 9 mL akuades steril, kemudian dihomogenisasi. Untuk pengenceran selanjutnya, 1 mL suspensi dipindahkan ke dalam 9 mL akuades steril dan dihomogenisasi hingga diperoleh pengenceran 10^{-6} .

Sebanyak 1 mL suspensi dari pengenceran 10^{-4} , 10^{-5} , dan 10^{-6} digunakan untuk isolasi bakteri dengan metode *pour plate*. Media yang digunakan adalah Luria Bertani (LB) agar yang ditambahkan HgCl_2 dengan berbagai konsentrasi 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm. Setiap inokulasi dilakukan sebanyak tiga kali (triplo) dan diinkubasi pada suhu ruang selama 72 sampai 96 jam.

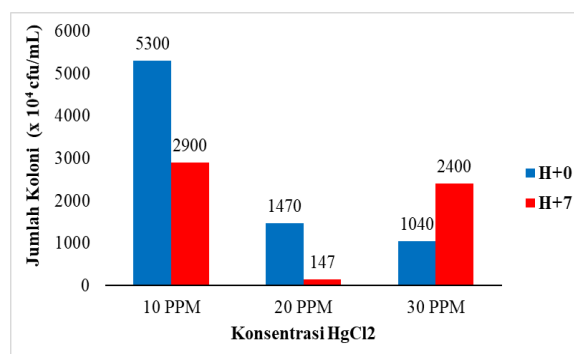
Adapun analisis data yang digunakan pada penelitian ini dilakukan secara deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi pertumbuhan serta keragaman bakteri indigenous pada sampel tanah masing-masing perlakuan (tanpa HgCl_2 dan dengan HgCl_2) dan membandingkan pola pertumbuhan koloni pada hari ke-0 dan hari ke-7. Analisis data kuantitatif berupa perhitungan jumlah koloni berdasarkan *Colony Forming Unit* (CFU/mL) pada berbagai tingkat pengenceran, kemudian dilakukan analisis varians (ANOVA) untuk menentukan pengaruh waktu inkubasi dan keberadaan HgCl_2 terhadap kemampuan pertumbuhan bakteri. Sementara data kualitatif berupa karakter morfologi koloni meliputi, bentuk, warna, tepi, elevasi dan tekstur untuk menunjukkan keragaman isolat. Hasil penelitian kemudian disajikan dalam tabel dan grafik untuk menampilkan perbedaan pertumbuhan dan keragaman bakteri berdasarkan perlakuan dan waktu inkubasi.

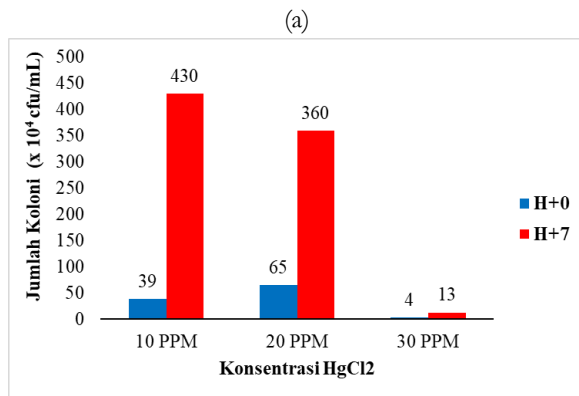
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perhitungan jumlah koloni bakteri (CFU/mL) yang ditampilkan pada Gambar 1(a), terlihat adanya perbedaan jumlah koloni pada sampel tanah tanpa penambahan HgCl_2 pada hari ke-0 dan hari ke-7 inkubasi.

Jumlah koloni pada hari ke-0 lebih tinggi dibandingkan dengan hari ke-7. Selain itu, pada perlakuan dengan penambahan HgCl_2 sebesar 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm pada hari ke-0, jumlah koloni menunjukkan tren penurunan seiring dengan meningkatnya konsentrasi merkuri dalam medium. Menariknya, dengan penambahan HgCl_2 30 ppm terjadi peningkatan jumlah koloni setelah hari ke-7 inkubasi. Fenomena ini mengindikasikan adanya kemampuan adaptasi mikroorganisme terhadap tekanan lingkungan yang ditimbulkan oleh logam berat. Sebaliknya, pada Gambar 2(b) terlihat pola berbeda, yaitu jumlah koloni cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu inkubasi, meskipun mengalami penurunan pada konsentrasi 30 ppm. Du dkk (2023) menjelaskan bahwa pada skala komunitas tanah, merkuri menghambat aktivitas bakteri dan mampu mengubah struktur komunitasnya pada konsentrasi lebih tinggi, sehingga dapat diketahui batas toleransi ekologis dari bakteri indigenous tersebut.

Peningkatan jumlah koloni pada konsentrasi merkuri yang relatif tinggi menunjukkan bahwa sebagian bakteri mampu bertahan hidup dan beradaptasi dalam kondisi toksik. Kemampuan ini berkaitan dengan sifat resistensi terhadap merkuri yang memungkinkan bakteri untuk menekan efek toksisitas logam melalui mekanisme fisiologis dan enzimatis tertentu. Mekanisme tersebut umumnya melibatkan sistem gen mer (mer operon), terutama enzim merA yang berperan yang memungkinkan bakteri menetralkan Hg melalui reduksi sehingga bakteri tidak hanya mampu bertahan, tetapi juga berpotensi memanfaatkan merkuri sebagai bagian dari strategi metabolisme (González-Reguero dkk., 2023).





(b)

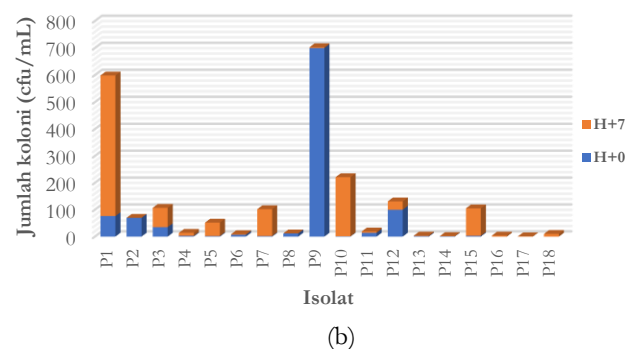
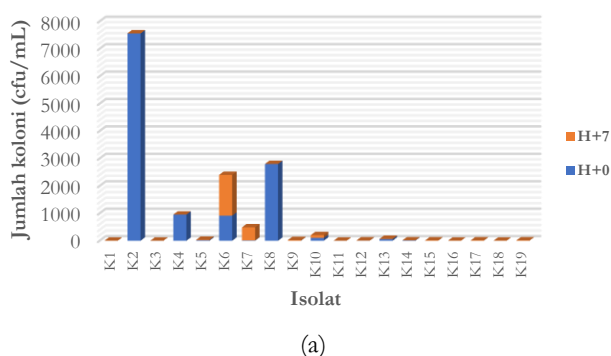
Gambar 1. Jumlah koloni bakteri (cfu/ml) pada sampel tanah (a) tanpa penambahan HgCl₂ dan (b) dengan penambahan HgCl₂.

Keanekaragaman bakteri pada sampel tanah tanpa penambahan HgCl₂ dan dengan penambahan HgCl₂ menunjukkan jumlah isolat yang relatif sama, yakni masing-masing 19 strain bakteri pada sampel tanpa HgCl₂ dan 18 strain pada sampel dengan HgCl₂ (Gambar 2). Meskipun jumlah isolat yang diperoleh hampir sama, pola pertumbuhan antar isolat menunjukkan variasi yang cukup signifikan.

Isolat K2, K8, dan K7 menunjukkan pertumbuhan yang relatif tinggi dibandingkan isolat lainnya (Gambar 2a). Isolat K2 menunjukkan jumlah koloni tertinggi pada hari ke-0, yaitu mencapai 7560 cfu/ml, diikuti isolat K8 dengan 2800 cfu/ml. Namun, kedua isolat tersebut mengalami penurunan pertumbuhan yang sangat tajam pada hari ke-7, hanya tersisa koloni dengan 1 cfu/ml. Hal

ini mengindikasikan bahwa meskipun awalnya mampu tumbuh dengan cepat, isolat-isolat tersebut memiliki keterbatasan dalam mempertahankan viabilitasnya pada paparan merkuri dalam periode inkubasi yang lebih panjang. Sebaliknya, isolat K6 menunjukkan pola pertumbuhan yang berbeda, yakni terjadi peningkatan seiring waktu inkubasi. Jumlah koloni pada hari ke-0 tercatat 912 cfu/ml dan meningkat menjadi 1487 cfu/ml pada hari ke-7. Hal ini menunjukkan bahwa isolat K6 memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap lingkungan yang tercemar merkuri, sehingga dapat mempertahankan hingga meningkatkan pertumbuhan selama diinkubasi.

Hasil ini menunjukkan adanya perbedaan kemampuan isolat bakteri dalam merespon tekanan lingkungan yang mengandung merkuri. Isolat yang mengalami penurunan signifikan kemungkinan memiliki mekanisme detoksifikasi yang terbatas, sehingga tidak mampu bertahan pada konsentrasi merkuri yang lebih tinggi atau setelah periode inkubasi yang lebih lama. Sebaliknya, isolat yang menunjukkan pertumbuhan berkelanjutan, seperti K6, kemungkinan memiliki mekanisme resistensi, misalnya dengan keberadaan gen mer operon yang berperan dalam reduksi Hg²⁺ menjadi bentuk yang kurang toksik, yaitu Hg⁰ seperti yang telah dijelaskan sebelumnya dari beberapa penelitian pendukung lainnya.

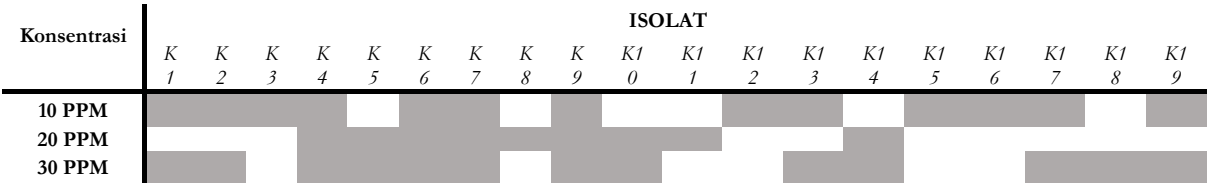


Gambar 2. Keanekaragaman bakteri dari sampel tanah (a) tanpa penambahan HgCl₂ dan (b) dengan penambahan HgCl₂

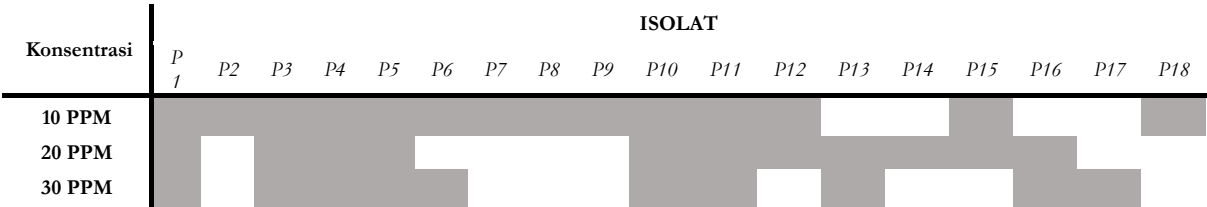
Pada perlakuan dengan penambahan HgCl₂, beberapa isolat menunjukkan pola pertumbuhan koloni yang berbeda. Isolat P9 memiliki jumlah koloni yang relatif tinggi pada hari ke-0 inkubasi, yaitu mencapai 700 cfu/ml, namun mengalami penurunan tajam hingga hanya 3 cfu/ml pada hari ke-7. Sebaliknya, isolat P1 menunjukkan pola pertumbuhan yang meningkat seiring waktu inkubasi, dengan jumlah koloni mencapai 522 cfu/ml pada hari ke-7. Sementara itu, isolat P10 hanya menunjukkan pertumbuhan pada hari ke-7 dengan jumlah koloni yang cukup tinggi, yaitu 220 cfu/ml. Pola ini mengindikasikan adanya variasi mekanisme adaptasi bakteri terhadap paparan merkuri. Beberapa isolat menunjukkan ketahanan jangka pendek, sementara yang lain mampu bertahan dan tumbuh pada periode inkubasi lebih lama.

Keragaman bakteri pada sampel tanah menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh waktu inkubasi dan keberadaan HgCl₂. Pada hari ke-0, jumlah strain yang teridentifikasi adalah 14 strain pada sampel tanah tanpa

penambahan HgCl₂ dan 15 strain pada sampel tanah dengan penambahan HgCl₂. Setelah 7 hari inkubasi, jumlah strain yang ditemukan relatif meningkat, yaitu 14 strain pada tanah tanpa penambahan HgCl₂ dan 16 strain pada tanah dengan penambahan HgCl₂. Hasil ini menunjukkan terdapat beberapa strain yang baru muncul pada hari ke-7, sementara beberapa strain lainnya tidak lagi terdeteksi pada periode inkubasi yang sama, baik pada sampel kontrol maupun perlakuan dengan merkuri. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa pengaruh penambahan awal merkuri, ternyata dapat menghambat pertumbuhan bakteri pada hari ke-0. Namun setelah diinkubasi selama 7 hari, sebagian bakteri menunjukkan kemampuannya dalam mereduksi HgCl₂ yang ditambahkan pada awal perlakuan, sehingga populasi bakteri kembali meningkat karena ada proses adaptasi bakteri. Hal ini sejalan dengan temuan Abu-Dieyeh dkk. (2019) yang melaporkan bahwa keberadaan merkuri dapat menghambat pertumbuhan mikroba pada tahap awal perlakuan. Namun, beberapa strain mampu mengembangkan mekanisme resistensi dan detoksifikasi seiring dengan peningkatan waktu inkubasi.



(a)



(b)

Gambar 3. Pola sebaran isolat bakteri hasil isolasi pada sampel tanah (a) tanpa penambahan HgCl₂ dan (b) dengan penambahan HgCl₂.

Berdasarkan dari persebaran pertumbuhan koloni pada konsentrasi merkuri 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm

(gambar 3a dan 3b.) terlihat bahwa keenam isolat yaitu K2, K8, K7, P9, P1 dan P10 menunjukkan variasi dalam

toleransi terhadap peningkatan konsentrasi merkuri. Isolat K2 mampu tumbuh pada konsentrasi merkuri 10 ppm dan 30 ppm, sedangkan isolat K8 menunjukkan pertumbuhan hanya pada konsentrasi merkuri 30 ppm. Tiga isolat lainnya K7, P1 dan P10 menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi karena mampu tumbuh pada semua konsentrasi yang diuji (10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm). Sedangkan isolat P9 ditemukan hanya mampu bertahan pada konsentrasi merkuri 10 ppm. Hasil ini menunjukkan adanya perbedaan kemampuan adaptasi antar isolat, beberapa bakteri memiliki resistensi yang lebih luas terhadap paparan merkuri, sedangkan bakteri lainnya hanya mampu bertahan pada kondisi tertentu.

Semakin tinggi konsentrasi Hg yang diberikan pada media pertumbuhan bakteri, maka semakin besar tingkat kematian bakteri yang terjadi. Bakteri mempunyai kemampuan terbatas dalam mentolerir polutan dalam habitatnya. Quintero dkk. (2024) menegaskan bahwa keberlangsungan tumbuh pada ≥ 5 ppm HgCl_2 mencerminkan adanya resistensi tinggi pada bakteri yang mampu tumbuh pada media sintesis merupakan isolat bakteri yang sangat resisten terhadap merkuri. Dengan demikian, diperoleh bahwa isolat K2, K8, K7, P1 dan P10 merupakan bakteri resisten terhadap merkuri.

Konsentrasi merkuri (10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm) yang diberikan pada media pertumbuhan bakteri akan memberikan pengaruh terhadap bakteri pendegradasi merkuri untuk mensekresi enzim merkuri reduktase. Enzim tersebut akan mengubah ion Hg^+ menjadi bentuk Hg^3 didalam sitoplasmik (Niane dkk., 2019). Mikrobial yang resisten terhadap merkuri ini memiliki peran penting sebagai agen bioremediasi (Putra dkk., 2021).

Penelitian Wang dan Cheng (2019) Bakteri yang mampu mereduksi merkuri memiliki sistem enzim spesifik untuk mendetoksifikasi HgCl_2 sehingga terakumulasi dalam bentuk lain. Temuan tersebut konsisten dengan hasil pada penelitian ini, dimana bakteri indigenous dari tanah TPA menunjukkan kapasitas adaptasi pada konsentrasi merkuri yang relatif tinggi (30 ppm). Hal ini didukung oleh penelitian Zhao dkk. (2025) yang menyebutkan adanya konsorsium bakteri yang

menghasilkan metabolit dan selanjutnya akan digunakan sebagai nutrisi oleh bakteri lain. Interaksi ini penting dalam menjaga kestabilan komunitas, efisiensi degradasi polutan, dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan.

Karakterisasi morfologi dilakukan untuk menunjukkan adanya variasi bentuk, warna, dan tepi koloni pada media selektif. Isolat yang diperoleh dari sampel dengan HgCl_2 umumnya membentuk koloni berukuran kecil dengan tepi tidak beraturan, sedangkan pada kontrol ditemukan koloni dengan ukuran lebih besar dan permukaan halus. Variasi morfologi koloni ini menunjukkan adanya keragaman bakteri indigenous yang mampu bertahan pada kondisi terpapar merkuri. Menurut Goswami dkk. (2023) melalui penelitiannya menyebutkan bahwa, keberagaman morfologi koloni berkorelasi dengan variasi spesies bakteri, yang berpotensi memiliki mekanisme resistensi berbeda terhadap logam berat, serta memberikan data empiris bahwa morfologi berbeda sering mewakili spesies/strain dengan mekanisme resistensi yang berbeda. Data karakter morfologi koloni bakteri indigenous pada masing-masing perlakuan disajikan pada *supplementary data 1-4*.

Dengan demikian, hasil penelitian memberikan informasi bahwa isolat yang ditemukan dalam jumlah melimpah merupakan isolat yang memiliki daya resisten yang tinggi terhadap konsentrasi HgCl_2 yang ada di lingkungan. Bakteri yang mampu mereduksi merkuri memiliki sistem enzim spesifik untuk mendetoksifikasi HgCl_2 sehingga terakumulasi dalam bentuk lain. Semakin tinggi konsentrasi Hg yang diberikan pada media pertumbuhan bakteri, maka semakin besar tingkat kematian bakteri yang terjadi. Hal ini berkaitan dengan kemampuan bakteri dalam mereduksi Hg itu sendiri. Bakteri mempunyai kemampuan terbatas dalam mentolerir polutan dalam habitatnya. Selain itu, keanekaragaman dan dinamika pertumbuhan isolat pada penelitian ini memberikan gambaran awal tentang potensi bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi pada lingkungan tercemar merkuri.

Isolasi dan karakterisasi awal telah berhasil dilakukan, namun informasi yang diperoleh masih terbatas pada

tingkat morfologi. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut untuk memastikan identitas taksonomi bakteri secara akurat. Identifikasi spesies dan genus dapat dilakukan melalui pendekatan molekuler dalam penentuan klasifikasi bakteri dan tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai potensi ekologis dan aplikatif isolat-isolat yang teridentifikasi dalam bioremediasi kontaminan merkuri.

KESIMPULAN

Bakteri indigenous pendegradasi merkuri yang diisolasi dari tanah di TPA Piyungan memiliki keragaman bakteri yang cukup tinggi. Sebanyak 37 isolat bakteri indigenous pendegradasi merkuri berhasil diisolasi dengan variasi toleransi yang berbeda. Lima isolat (K2, K8, K7, P1, dan P10) menunjukkan kemampuan reduksi merkuri yang tinggi berdasarkan pada jumlah koloni (cfu/ml) dan persebarannya dalam berbagai konsentrasi HgCl_2 . Terutama pada konsentrasi hingga 30 ppm yang mengindikasikan resistensi terhadap merkuri. Efisiensi reduksi terbaik diperoleh pada konsentrasi rendah (10 ppm). Penelitian ini membuktikan bahwa potensi bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi ramah lingkungan untuk mengurangi dampak toksisitas merkuri di lingkungan tercemar.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada tim peneliti Ekologi Mikroba Angkatan 2019, Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Biologi Universitas Gadjah Mada.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Dieyeh, M. H., Alduroobi, H. M., dan Al-Ghouti, M. A. 2019. Potential of mercury-tolerant bacteria for bio-uptake of mercury leached from discarded fluorescent lamps. *Journal of Environmental Management*. Vol. 23.
- Du, J., Ren, Y., Li, J., Zhang, S., Huang, H., dan Liu, J. 2023. The study on the effect of mercury pollution on soil microorganisms around mercury mining area. *Sci Rep*. Vol. 13.
- González-Reguero, D., Robas-Mora, M., Probanza Lobo, A. 2023. Bioremediation of environments contaminated with mercury. Present and perspectives. *World J Microbiol Biotechnol*. Vol. 39. No. 249.
- Gworek, B., Dmuchowski, W., dan Baczewska-Dąbrowska, A. H. 2020. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe*. Vol. 32. No. 128.
- Imron, M. F., Kurniawan, S. B., dan Soegianto, A. 2019. Characterization of mercury-reducing potential bacteria isolated from Keputih non-active sanitary landfill leachate, Surabaya, Indonesia under different saline conditions. *Journal of Environmental Management*. Vol. 24.
- Niane, B., Devarajan, N., Poté, J., dan Moritz, R. 2019. Quantification and characterization of mercury resistant bacteria in sediments contaminated by artisanal small-scale gold mining activities, Kedougou region, Senegal. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 205.
- Olaya-Abril, A., Biello, K., Rodríguez Caballero, G., Cabello, P., Sáez, L.P., Moreno-Vivián, C. 2024. Bacterial tolerance and detoxification of cyanide, arsenic and heavy metals: Holistic approaches applied to bioremediation of industrial complex wastes. *Microbial Biotechnology*. Vol. 17.
- Putra, A. R., Santoso, D., dan Lestari, S. 2021. Resistensi bakteri indigenous terhadap logam berat dari lingkungan tercemar limbah industri. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*. Vol.15 No. 2.
- Quintero M., Zuluaga-Valencia SD., Ríos-López LG., Sánchez O., Bernal CA., Sepúlveda N., dan Gómez-León J. 2024. Mercury-Resistant Bacteria Isolated from an Estuarine Ecosystem with Detoxification Potential. *Microorganisms*. Vol 19. No. 12.
- Rani, R., dan Juwarkar, A. A. 2020. Potential of indigenous microorganisms for sustainable bioremediation of heavy metals from contaminated environments. *Environmental Technology & Innovation*. Vol. 20.
- Sari, N. P., Nugroho, A., dan Utami, W. 2020. Aktivitas enzim merkuri reduktase pada bakteri resisten merkuri hasil isolasi dari limbah tambang emas. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. Vol 12. No. 3.
- Sreedevi, P.R., Suresh, K., Jiang, G., 2022. Bacterial bioremediation of heavy metals in wastewater: A review of processes and applications. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 48.
- Wang, J., dan Chen, C. 2019. Microbial remediation of heavy metals. *Frontiers in Microbiology*. Vol. 10.
- Zhao G., Yu H., Wang J., Jiang B., Zhong F., Zhang R., Jiang T., Yang M., Wang H., dan Huang X. 2025. Cross-feeding and co-degradation within a bacterial consortium dominated by challenging-to-culture *Leucobacter* sp. HA-1 enhances sulfonamide degradation. *Appl Environ Microbiol*. Vol. 24. No. 91.
- Zhou C., Xu P., Huang C., Liu G., Chen S., Hu G., Li G., Liu P., dan Guo X. 2020. Effects of subchronic exposure of mercuric chloride on intestinal histology and microbiota in the cecum of chicken. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 188.