

Potensi *Pseudomonas sp.* Dalam Bioremediasi Limbah B₃ Merkuri Berdasarkan Tinjauan Literatur

Tomi Laksono

program studi Biologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
e-mail: tomilaksonoo2@gmail.com

Kata Kunci:

bioremediasi, limbah B₃, merkuri, *Pseudomonas sp.*, studi pustaka.

Keywords:

bioremediation, hazardous waste (B₃), mercury, *Pseudomonas sp.*, literature study.

ABSTRAK

Limbah B₃ yang mengandung merkuri merupakan salah satu pencemar lingkungan yang berbahaya karena bersifat toksik, persisten, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Upaya pengolahan limbah merkuri secara konvensional sering kali memerlukan biaya tinggi dan berpotensi menimbulkan dampak lingkungan sekunder. Oleh karena itu, bioremediasi menggunakan mikroorganisme menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi *Pseudomonas sp.* dalam proses bioremediasi limbah B₃ merkuri berdasarkan tinjauan literatur. Metode yang digunakan adalah studi pustaka dengan

menganalisis artikel ilmiah nasional dan internasional yang relevan dalam sepuluh tahun terakhir. Hasil kajian menunjukkan bahwa *Pseudomonas sp.* memiliki kemampuan adaptif yang baik terhadap lingkungan tercemar merkuri serta mampu menurunkan konsentrasi merkuri melalui berbagai mekanisme, seperti biosorpsi, bioakumulasi, dan transformasi enzimatik. Berdasarkan hasil kajian tersebut, *Pseudomonas sp.* berpotensi besar untuk dikembangkan sebagai agen bioremediasi limbah B₃ merkuri yang berkelanjutan dan aman bagi lingkungan.

ABSTRACT

Hazardous waste containing mercury is one of the dangerous environmental pollutants due to its toxic, persistent nature and ability to accumulate in the food chain. Conventional mercury waste treatment efforts often require high costs and potentially cause secondary environmental impacts. Therefore, bioremediation using microorganisms has become a more environmentally friendly alternative. This research aims to examine the potential of *Pseudomonas sp.* in the bioremediation process of mercury hazardous waste based on a literature review. The method used is a literature study by analyzing relevant national and international scientific articles from the past ten years. The review results show that *Pseudomonas sp.* has good adaptive capabilities in mercury-contaminated environments and is able to reduce mercury concentrations through various mechanisms, such as biosorption, bioaccumulation, and enzymatic transformation. Based on these review findings, *Pseudomonas sp.* has great potential to be developed as a sustainable and environmentally safe bioremediation agent for mercury hazardous waste.

Pendahuluan

Merkuri (Hg) merupakan salah satu logam berat yang masuk dalam kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B₃) yang menjadi perhatian serius dalam konteks pencemaran lingkungan global. Kontaminasi merkuri dapat berasal dari berbagai aktivitas antropogenik seperti pertambangan emas skala kecil, industri klorin-alkali, pembangkit listrik tenaga batu bara, dan pembuangan limbah elektronik (Briffa et al., 2020). Sifat toksik merkuri yang persisten dalam lingkungan serta kemampuannya untuk mengalami biomagnifikasi dalam rantai makanan menjadikan logam berat ini sebagai



ancaman serius bagi kesehatan manusia dan ekosistem (Beckers & Rinklebe, 2017). Akumulasi logam berat dalam tubuh dapat mengganggu kesehatan manusia, merkuri dapat menyebabkan kerusakan saraf, kebutaan, gangguan jiwa, dan cacat pada bayi dalam kandungan (Safitri & Eny, 2012). Bentuk organik merkuri, khususnya metilmerkuri, merupakan bentuk yang paling berbahaya karena mudah diserap oleh organisme dan terakumulasi dalam jaringan biologis (Kocman et al., 2017). Oleh karena itu, upaya pengelolaan dan remediasi limbah merkuri menjadi prioritas dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan kesehatan publik.

Metode konvensional untuk pengolahan limbah merkuri seperti presipitasi kimia, adsorpsi karbon aktif, dan stabilisasi-solidifikasi telah banyak diterapkan, namun pendekatan-pendekatan tersebut memiliki keterbatasan signifikan. Teknologi konvensional umumnya memerlukan biaya operasional yang tinggi, menghasilkan limbah sekunder yang berpotensi mencemari lingkungan, serta kurang efektif dalam menangani kontaminasi merkuri pada konsentrasi rendah di lingkungan yang kompleks (Ojuederie & Babalola, 2017). Keterbatasan ini mendorong pengembangan teknologi alternatif yang lebih ekonomis, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Bioremediasi menggunakan mikroorganisme telah muncul sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi pencemaran logam berat, termasuk merkuri. Teknologi ini memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk mengubah, mengimobilisasi, atau mendetoksifikasi kontaminan melalui berbagai mekanisme biokimia. Bioremediasi menawarkan keunggulan dibandingkan metode konvensional, antara lain biaya yang lebih rendah, dampak lingkungan minimal, dan dapat diaplikasikan secara *in situ* maupun *ex situ* (Malik, 2004). Keberhasilan bioremediasi sangat bergantung pada pemilihan mikroorganisme yang tepat dengan karakteristik toleransi dan kemampuan remediasi yang optimal.

***Pseudomonas sp.* Sebagai Agen Bioremediasi**

Genus *Pseudomonas* merupakan salah satu kelompok bakteri yang paling banyak dipelajari dalam konteks bioremediasi logam berat karena karakteristik uniknya yang sangat menguntungkan untuk aplikasi lingkungan. Bakteri ini termasuk dalam kelompok gram negative yang bersifat aerobik, memiliki metabolisme yang sangat versatil, serta mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang ekstrem seperti pH rendah, suhu tinggi, dan paparan logam berat yang tinggi (Palleroni, 2015). Keunggulan utama *Pseudomonas sp.* terletak pada kemampuannya menghasilkan berbagai enzim ekstraseluler dan metabolit sekunder yang mendukung proses degradasi kontaminan. *Pseudomonas sp.* telah terbukti memiliki kemampuan untuk meremediasi berbagai jenis kontaminan, termasuk hidrokarbon aromatik polisiklik, pestisida organoklorin, dan logam berat seperti kadmium, timbal, kromium, arsenik, dan merkuri melalui mekanisme biosorpsi, bioakumulasi, dan biotransformasi (Singh et al., 2021).

Keunggulan *Pseudomonas sp.* dalam bioremediasi merkuri terletak pada kemampuannya untuk mengekspresikan gen resistensi merkuri (*mer operon*) yang mengkode enzim merkuri reduktase. Enzim ini dapat mengkatalisis reduksi ion merkuri (Hg^{2+}) menjadi merkuri elemental (Hg^0) yang bersifat volatil dan kurang toksik (Barkay et al., 2003). Selain mekanisme transformasi enzimatik, *Pseudomonas sp.* juga mampu melakukan biosorpsi dan bioakumulasi merkuri melalui interaksi dengan komponen

permukaan sel seperti peptidoglikan, lipopolisakarida, dan protein ekstraseluler (Irawati et al., 2017).

Beberapa penelitian telah menunjukkan efektivitas *Pseudomonas sp.* dalam menurunkan konsentrasi merkuri pada berbagai matriks lingkungan. Strain *Pseudomonas aeruginosa* dilaporkan mampu menurunkan konsentrasi merkuri hingga 80-90% dalam media cair pada kondisi optimal (Kumar et al., 2011). Penelitian di Indonesia juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, dimana isolat bakteri *Pseudomonas sp.* yang diisolasi dari tanah tercemar merkuri di area pertambangan emas tradisional mampu mengurangi konsentrasi merkuri secara signifikan melalui mekanisme bioakumulasi dan biotransformasi (Sari & Setiadi, 2019). *Pseudomonas putida* juga menunjukkan kemampuan bioremediasi yang signifikan dengan tingkat penyisihan merkuri mencapai 75% dalam waktu inkubasi 72 jam (Dash & Das, 2012). Keberhasilan isolat-isolat ini mengindikasikan potensi besar genus *Pseudomonas* untuk dikembangkan sebagai agen bioremediasi limbah B3 merkuri yang efektif dan efisien.

Studi yang dilakukan oleh Widyaningsih et al. (2020) pada limbah cair industri yang mengandung merkuri menunjukkan bahwa konsorsium bakteri yang didominasi oleh *Pseudomonas sp.* mampu menurunkan kadar merkuri hingga 85% dalam waktu 7 hari inkubasi dengan kondisi pH optimal 7-8 dan suhu 30-35°C. Hasil ini menguatkan potensi aplikasi *Pseudomonas sp.* dalam skala industri untuk pengolahan limbah B3 merkuri di Indonesia. Selain itu, penelitian Kurniawan dan Mukono (2018) mengidentifikasi bahwa *Pseudomonas sp.* indigenous dari tanah tercemar merkuri di Kalimantan memiliki toleransi yang lebih tinggi terhadap konsentrasi merkuri dibandingkan strain komersial, menunjukkan pentingnya eksplorasi isolat lokal untuk aplikasi bioremediasi yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan Indonesia. Meskipun telah banyak penelitian yang mengeksplorasi potensi *Pseudomonas sp.* dalam bioremediasi merkuri, masih diperlukan kajian komprehensif yang mengintegrasikan berbagai temuan untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang mekanisme, efektivitas, dan prospek aplikasi teknologi ini. Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan menganalisis artikel ilmiah nasional dan internasional yang relevan dari database seperti Google Scholar, PubMed, ScienceDirect, Scopus, dan Portal Garuda dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir (2014-2024).

Pembahasan

Karakteristik Dan Mekanisme Resistensi Merkuri Pada *Pseudomonas sp.*

Pseudomonas sp. merupakan bakteri gram negatif yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan ekstrem, termasuk lingkungan yang tercemar logam berat merkuri. Kemampuan bakteri ini untuk bertahan hidup dalam kondisi toksik disebabkan oleh adanya sistem genetik khusus yang mengatur mekanisme resistensi terhadap merkuri. Gen resistensi merkuri (*mer operon*) pada *Pseudomonas sp.* terdiri dari beberapa komponen gen yang bekerja secara terkoordinasi, meliputi *merR* (gen regulator), *merT* dan *merP* (gen transport), *merA* (gen merkuri reduktase), dan *merB* (gen organo-merkuri liase) (Barkay et al., 2003). Sistem *mer operon* ini memungkinkan bakteri untuk mendeteksi keberadaan ion

merkuri di lingkungan dan merespons dengan mengekspresikan enzim-enzim yang diperlukan untuk detoksifikasi merkuri. Penelitian yang dilakukan oleh Rasmussen et al. (2008) menunjukkan bahwa ekspresi gen *merA* pada *Pseudomonas* sp. meningkat secara signifikan ketika terpapar ion merkuri (Hg^{2+}) dengan konsentrasi 0,5-5 mg/L. Gen *merA* mengkode enzim merkuri reduktase yang mampu mengkatalisis reaksi reduksi ion merkuri (Hg^{2+}) menjadi merkuri elemental (Hg^0) yang bersifat volatil dan memiliki tingkat toksisitas lebih rendah. Studi serupa oleh Yunus et al. (2016) pada isolat *Pseudomonas aeruginosa* dari Indonesia menunjukkan bahwa aktivitas enzim merkuri reduktase mencapai puncaknya pada jam ke-48 inkubasi dengan konsentrasi merkuri 2 mg/L, menghasilkan efisiensi reduksi merkuri sebesar 78,5%. Mekanisme transformasi enzimatik ini menjadi salah satu strategi utama bakteri dalam mengurangi toksisitas merkuri di lingkungan tercemar.

Selain transformasi enzimatik, *Pseudomonas* sp. juga memiliki kemampuan untuk melakukan biosorpsi merkuri melalui interaksi fisikokimia antara ion merkuri dengan komponen permukaan sel bakteri. Dinding sel bakteri gram negatif seperti *Pseudomonas* sp. mengandung berbagai gugus fungsi seperti karboksil, amino, hidroksil, fosfat, dan sulfhidril yang dapat berikatan dengan ion logam berat (Malik, 2004). Penelitian Sari dan Setiadi (2019) menunjukkan bahwa biomassa *Pseudomonas* sp. yang telah diinaktivasi (sel mati) masih mampu menyerap merkuri dengan kapasitas adsorpsi mencapai 45,6 mg Hg/g biomassa kering, mengindikasikan bahwa mekanisme biosorpsi tidak bergantung pada metabolisme sel yang aktif. Hal ini sejalan dengan temuan Pardo et al. (2003) yang melaporkan bahwa gugus karboksil dan fosfat pada lipopolisakarida dinding sel *Pseudomonas putida* memiliki afinitas tinggi terhadap ion Hg^{2+} , dengan kapasitas adsorpsi maksimum 67,8 mg/g pada pH 6-7.

Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Efektivitas Bioremediasi Merkuri

Efektivitas bioremediasi merkuri oleh *Pseudomonas* sp. sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter lingkungan seperti pH, suhu, konsentrasi merkuri awal, ketersediaan nutrisi, dan keberadaan logam berat lain. Parameter pH merupakan faktor krusial yang mempengaruhi spesiasi ion merkuri, aktivitas enzim, dan muatan permukaan sel bakteri. Menurut penelitian Dash dan Das (2012), *Pseudomonas* sp. menunjukkan aktivitas bioremediasi optimal pada rentang pH 6,5-8,0, dimana pada kondisi ini ion Hg^{2+} berada dalam bentuk terlarut yang mudah diakses oleh sistem transport bakteri. Pada pH di bawah 5,0, efisiensi bioremediasi menurun drastis hingga 40% karena terjadinya denaturasi enzim merkuri reduktase dan persaingan ion H^+ dengan ion Hg^{2+} pada situs aktif biosorpsi (Irawati et al., 2017).

Suhu inkubasi juga berperan penting dalam mengatur aktivitas metabolisme bakteri dan laju reaksi enzimatik. Widyarningsih et al. (2020) melaporkan bahwa *Pseudomonas* sp. dari isolat lokal Indonesia menunjukkan aktivitas bioremediasi merkuri tertinggi pada suhu 30-35°C dengan efisiensi penyisihan mencapai 85% dalam 7 hari inkubasi. Pada suhu di atas 40°C, aktivitas bakteri menurun signifikan akibat denaturasi protein dan gangguan integritas membran sel, sedangkan pada suhu di bawah 20°C, laju pertumbuhan bakteri dan aktivitas enzim merkuri reduktase menurun hingga 60% (Kurniawan & Mukono, 2018). Temuan ini sesuai dengan karakteristik *Pseudomonas* sp. sebagai bakteri mesofil yang memiliki suhu optimal pertumbuhan pada kisaran 25-37°C.

Konsentrasi merkuri awal dalam media juga mempengaruhi kemampuan bioremediasi *Pseudomonas* sp. Pada konsentrasi rendah hingga sedang (0,1-5 mg/L), bakteri mampu melakukan bioremediasi dengan efisiensi tinggi karena sistem detoksifikasi masih dapat berfungsi optimal. Namun, pada konsentrasi merkuri yang sangat tinggi (>10 mg/L), terjadi efek inhibisi terhadap pertumbuhan bakteri dan aktivitas enzim (Kumar et al., 2011). Penelitian oleh Setyowati et al. (2019) menunjukkan bahwa *Pseudomonas aeruginosa* mengalami penurunan viabilitas sel hingga 70% ketika terpapar merkuri dengan konsentrasi 15 mg/L, meskipun sel yang bertahan masih menunjukkan aktivitas reduktase merkuri. Oleh karena itu, untuk aplikasi bioremediasi pada limbah dengan konsentrasi merkuri tinggi, diperlukan strategi pengenceran atau perlakuan pendahuluan untuk mengurangi toksisitas awal. Ketersediaan nutrisi seperti sumber karbon, nitrogen, dan fosfat juga berpengaruh terhadap kemampuan bioremediasi *Pseudomonas* sp. Bakteri memerlukan energi dan nutrisi yang cukup untuk mensintesis enzim-enzim detoksifikasi dan mempertahankan integritas sel dalam kondisi stres. Penelitian Ojuederie dan Babalola (2017) menunjukkan bahwa penambahan glukosa sebagai sumber karbon dan ekstrak yeast sebagai sumber nitrogen kompleks dapat meningkatkan efisiensi bioremediasi merkuri hingga 25% dibandingkan dengan media minimal. Namun, konsentrasi nutrisi yang berlebihan dapat menyebabkan pertumbuhan bakteri yang terlalu cepat dan menghasilkan biomassa berlebih yang justru menghambat kontak antara sel bakteri dengan ion merkuri dalam larutan (Malik, 2004)

Perbandingan Efektivitas Berbagai Spesies *Pseudomonas* Dalam Bioremediasi Merkuri

Berbagai spesies dalam genus *Pseudomonas* telah diteliti untuk aplikasi bioremediasi merkuri, dengan tingkat efektivitas yang bervariasi tergantung pada karakteristik genetik dan fisiologis masing-masing spesies. *Pseudomonas aeruginosa* merupakan spesies yang paling banyak dipelajari karena distribusinya yang luas dan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan ekstrem. Penelitian Kumar et al. (2011) melaporkan bahwa *P. aeruginosa* strain BCR1 yang diisolasi dari tanah tercemar logam berat mampu menurunkan konsentrasi merkuri hingga 90% dalam waktu 96 jam pada media cair dengan konsentrasi awal 5 mg/L. Strain ini juga menunjukkan kemampuan untuk tumbuh pada konsentrasi merkuri hingga 20 mg/L, mengindikasikan tingkat resistensi yang sangat tinggi.

Pseudomonas putida juga menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam bioremediasi merkuri, meskipun dengan mekanisme yang sedikit berbeda. Penelitian oleh Pardo et al. (2003) menunjukkan bahwa *P. putida* strain KT2440 lebih mengandalkan mekanisme biosorpsi dibandingkan biotransformasi enzimatik, dengan kapasitas adsorpsi mencapai 67,8 mg Hg/g biomassa kering. Strain ini memiliki keunggulan dalam hal stabilitas biosorpsi pada rentang pH yang lebih luas (pH 4-9) dibandingkan dengan *P. aeruginosa* yang optimal pada pH 6,5-8,0. Sari dan Setiadi (2019) juga melaporkan bahwa isolat *Pseudomonas* sp. indigenous dari Indonesia menunjukkan kemampuan bioremediasi yang sebanding dengan strain komersial, dengan efisiensi penyisihan merkuri mencapai 82% dalam 5 hari inkubasi.

Pseudomonas fluorescens merupakan spesies lain yang telah dieksplorasi untuk bioremediasi merkuri. Penelitian oleh Barkay et al. (2003) menunjukkan bahwa *P. fluorescens* memiliki keunikan dalam kemampuannya untuk membentuk biofilm yang

dapat meningkatkan kapasitas bioremediasi. Struktur biofilm menyediakan matriks ekstraseluler yang kaya akan exopolysaccharide (EPS) yang mengandung gugus fungsi negatif untuk mengikat ion merkuri. Selain itu, kondisi mikroaerofil dalam biofilm mendukung aktivitas bakteri anaerob fakultatif yang dapat melakukan metilasi dan demetilasi merkuri, meskipun mekanisme ini masih perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan tidak terbentuk metilmerkuri yang justru lebih toksik (Dash & Das, 2012).

Studi komparatif oleh Setyowati et al. (2019) membandingkan efektivitas tiga spesies *Pseudomonas* (*P. aeruginosa*, *P. putida*, dan *P. fluorescens*) dalam bioremediasi merkuri pada limbah cair industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *P. aeruginosa* memberikan efisiensi tertinggi (85,4%) diikuti oleh *P. putida* (78,2%) dan *P. fluorescens* (72,6%) setelah 7 hari inkubasi. Namun, dari segi stabilitas jangka panjang, *P. putida* menunjukkan kemampuan mempertahankan viabilitas sel lebih baik dalam kondisi paparan merkuri kronis, sedangkan *P. aeruginosa* mengalami penurunan aktivitas setelah 10 hari inkubasi. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan spesies *Pseudomonas* untuk aplikasi bioremediasi harus mempertimbangkan tidak hanya efisiensi penyisihan, tetapi juga durasi aplikasi dan kondisi spesifik lingkungan yang akan diremediasi.

Aplikasi Konsorsium Mikroba Untuk Meningkatkan Efisiensi Bioremediasi

Pendekatan bioremediasi menggunakan konsorsium mikroba yang terdiri dari beberapa spesies bakteri, termasuk *Pseudomonas* sp., telah menunjukkan hasil yang lebih efektif dibandingkan dengan penggunaan kultur murni tunggal. Konsorsium mikroba dapat memberikan keuntungan sinergis melalui pembagian fungsi metabolik, peningkatan toleransi terhadap kondisi stres, dan kemampuan untuk mendegradasi berbagai jenis kontaminan secara simultan (Ojuederie & Babalola, 2017). Dalam konteks bioremediasi merkuri, konsorsium yang melibatkan *Pseudomonas* sp. bersama dengan bakteri lain seperti *Bacillus* sp., *Enterobacter* sp., atau *Micrococcus* sp. dapat mengoptimalkan berbagai mekanisme detoksifikasi yang berbeda.

Penelitian Widyaningsih et al. (2020) menunjukkan bahwa konsorsium bakteri yang didominasi oleh *Pseudomonas* sp. (70%) dengan penambahan *Bacillus* sp. (20%) dan *Enterobacter* sp. (10%) mampu menurunkan kadar merkuri hingga 85% dalam waktu 7 hari, lebih tinggi dibandingkan dengan kultur murni *Pseudomonas* sp. yang hanya mencapai 72% dalam periode yang sama. Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh kemampuan *Bacillus* sp. dalam memproduksi biosurfaktan yang meningkatkan bioavailabilitas merkuri, sedangkan *Enterobacter* sp. mampu menghasilkan siderophore yang dapat mengkelat ion merkuri dan memfasilitasi proses biosorpsi. Interaksi sinergis antara berbagai spesies dalam konsorsium juga meningkatkan stabilitas komunitas mikroba dalam menghadapi fluktuasi kondisi lingkungan.

Keunggulan lain dari pendekatan konsorsium adalah kemampuan untuk melakukan bioremediasi pada limbah kompleks yang mengandung multiple kontaminan. Penelitian oleh Irawati et al. (2017) menunjukkan bahwa konsorsium *Pseudomonas* sp. dengan *Thiobacillus ferrooxidans* efektif dalam bioremediasi limbah pertambangan yang mengandung merkuri, arsenik, dan logam berat lainnya. *Pseudomonas* sp. berperan dalam detoksifikasi merkuri melalui reduksi enzimatik, sementara *T. ferrooxidans*

mengoksidasi sulfida logam dan menurunkan pH lokal yang mendukung pelarutan dan mobilisasi arsenik untuk kemudian diserap oleh biomassa bakteri. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penyisihan merkuri mencapai 88% dan arsenik 76% setelah 14 hari perlakuan dengan konsorsium, dibandingkan dengan 65% dan 52% pada kultur murni *Pseudomonas sp.*

Namun, aplikasi konsorsium mikroba juga memiliki tantangan tersendiri, terutama dalam hal stabilitas komposisi konsorsium dan persaingan antar spesies untuk nutrisi dan ruang tumbuh. Kurniawan dan Mukono (2018) melaporkan bahwa dalam konsorsium *Pseudomonas sp.* dengan *Bacillus sp.*, terjadi pergeseran dominansi populasi bakteri seiring waktu inkubasi, dimana *Bacillus sp.* cenderung mendominasi setelah 10 hari karena kemampuannya membentuk spora dalam kondisi stres. Pergeseran ini dapat mempengaruhi efektivitas bioremediasi jika *Bacillus sp.* memiliki kemampuan detoksifikasi merkuri yang lebih rendah. Oleh karena itu, optimasi rasio komposisi awal konsorsium dan monitoring dinamika populasi selama proses bioremediasi menjadi penting untuk menjaga kestabilan dan efektivitas sistem.

Tantangan Dan Prospek Aplikasi *Pseudomonas sp.* Dalam Bioremediasi Merkuri Skala Lapangan

Meskipun berbagai penelitian laboratorium menunjukkan potensi besar *Pseudomonas sp.* dalam bioremediasi merkuri, aplikasi teknologi ini pada skala lapangan masih menghadapi berbagai tantangan teknis dan ekonomis. Salah satu tantangan utama adalah kompleksitas kondisi lingkungan alami yang sangat berbeda dengan kondisi terkontrol di laboratorium. Faktor-faktor seperti variabilitas pH, suhu, keberadaan kontaminan lain, kompetisi dengan mikroorganisme indigenous, dan ketersediaan nutrisi yang fluktuatif dapat mempengaruhi keberhasilan bioremediasi di lapangan (Malik, 2004). Selain itu, bentuk spesiasi merkuri di lingkungan alami sering kali lebih kompleks, termasuk keberadaan kompleks merkuri-organik dan merkuri yang terikat pada matriks tanah atau sedimen yang sulit diakses oleh bakteri.

Penelitian oleh Beckers dan Rinklebe (2017) menunjukkan bahwa bioavailabilitas merkuri dalam tanah sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan organik, pH, dan potensial redoks. Dalam tanah dengan kandungan bahan organik tinggi, merkuri cenderung terikat kuat pada humic substances dan sulit untuk dimobilisasi dan diakses oleh bakteri. Hal ini menyebabkan efisiensi bioremediasi in situ lebih rendah dibandingkan dengan bioremediasi ex situ dimana substrat dapat dihomogenisasi dan kondisi dapat dikontrol. Setyowati et al. (2019) melaporkan bahwa efisiensi bioremediasi merkuri pada tanah tercemar di lapangan hanya mencapai 45-60% setelah 30 hari perlakuan dengan bioaugmentasi *Pseudomonas sp.*, jauh lebih rendah dibandingkan dengan hasil laboratorium yang mencapai 80-90% dalam waktu 7-14 hari.

Strategi untuk meningkatkan efektivitas bioremediasi di lapangan mencakup penggunaan teknik biostimulasi dan bioaugmentasi secara bersamaan. Biostimulasi dilakukan dengan menambahkan nutrisi dan senyawa pemicu pertumbuhan bakteri indigenous, sedangkan bioaugmentasi dilakukan dengan menginokulasi bakteri exogenous seperti *Pseudomonas sp.* yang telah diseleksi untuk resistensi merkuri tinggi (Ojuederie & Babalola, 2017). Penelitian Sari dan Setiadi (2019) menunjukkan bahwa

kombinasi bioaugmentasi dengan *Pseudomonas* sp. dan biostimulasi menggunakan kompos organik dapat meningkatkan efisiensi bioremediasi merkuri pada tanah tercemar hingga 75% dalam 60 hari. Penambahan bahan organik tidak hanya menyediakan nutrisi bagi bakteri tetapi juga meningkatkan porositas tanah dan aerasi yang mendukung aktivitas bakteri aerobik.

Aspek keamanan biologis (biosafety) juga menjadi pertimbangan penting dalam aplikasi *Pseudomonas* sp. untuk bioremediasi, terutama mengingat beberapa spesies seperti *P. aeruginosa* merupakan patogen oportunistik pada manusia. Meskipun strain yang digunakan untuk bioremediasi umumnya adalah strain lingkungan yang tidak virulen, masih terdapat kekhawatiran mengenai transfer gen resistensi merkuri ke bakteri patogen melalui horizontal gene transfer (Barkay et al., 2003). Oleh karena itu, penggunaan strain *Pseudomonas* yang telah dikarakterisasi secara molekuler dan dipastikan tidak membawa gen virulensi menjadi prioritas. Alternatif lain adalah penggunaan sel bakteri yang telah diinaktivasi (dead biomass) untuk biosorpsi, meskipun pendekatan ini menghilangkan keuntungan dari mekanisme biotransformasi enzimatis yang lebih efektif dalam menurunkan toksisitas merkuri. Ke depan, pengembangan teknologi bioremediasi merkuri menggunakan *Pseudomonas* sp. dapat difokuskan pada beberapa arah, antara lain: (1) rekayasa genetik untuk meningkatkan ekspresi gen mer dan kapasitas detoksifikasi, (2) pengembangan konsorsium mikroba sintetik yang dioptimasi untuk kondisi spesifik, (3) integrasi dengan teknologi fitoremediasi menggunakan tanaman hiperakumulator, (4) pengembangan sistem bioreaktor untuk bioremediasi ex situ yang lebih efisien, dan (5) aplikasi nanoteknologi untuk meningkatkan bioavailabilitas merkuri dan efektivitas kontak bakteri-kontaminan. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk memahami dinamika ekologi mikroba dalam sistem bioremediasi dan dampak jangka panjang terhadap ekosistem tanah.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan tinjauan literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *Pseudomonas* sp. memiliki potensi yang sangat besar sebagai agen bioremediasi limbah B3 merkuri. Bakteri ini menunjukkan kemampuan adaptasi yang baik terhadap lingkungan tercemar merkuri melalui sistem genetik khusus mer operon yang mengatur resistensi merkuri. Mekanisme bioremediasi yang dimiliki meliputi biotransformasi enzimatis melalui reduksi ion merkuri (Hg^{2+}) menjadi merkuri elemental (Hg^0), biosorpsi melalui interaksi dengan komponen permukaan sel, dan bioakumulasi intraseluler yang terbukti efektif dalam menurunkan konsentrasi merkuri pada berbagai matriks lingkungan. Efektivitas bioremediasi merkuri oleh *Pseudomonas* sp. sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter lingkungan dengan kondisi optimal meliputi pH 6,5-8,0, suhu 30-35°C, dan konsentrasi merkuri awal 0,1-5 mg/L. Berbagai spesies *Pseudomonas* menunjukkan karakteristik yang berbeda, dimana *P. aeruginosa* memberikan efisiensi tertinggi (85-90%), *P. putida* unggul dalam biosorpsi (67,8 mg Hg/g biomassa), dan *P. fluorescens* memiliki kemampuan membentuk biofilm. Isolat indigenous dari Indonesia menunjukkan performa yang sebanding atau lebih baik dibandingkan strain komersial dengan adaptasi yang lebih tinggi terhadap kondisi lingkungan tropis.

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk isolasi dan karakterisasi *Pseudomonas* sp. indigenous dari berbagai lokasi tercemar merkuri di Indonesia dengan karakterisasi molekuler yang komprehensif. Isolat lokal diharapkan memiliki performa lebih baik dan risiko biosafety lebih rendah dibandingkan strain komersial. Karakterisasi meliputi analisis gen mer operon, uji virulensi, dan profil resistensi antibiotik perlu dilakukan untuk memastikan keamanan biologis sebelum aplikasi di lapangan. Optimasi kondisi bioremediasi dan penelitian skala pilot di lapangan sangat diperlukan untuk validasi hasil laboratorium dan pengembangan protokol standar aplikasi. Protokol standar mencakup preparasi inokulum, metode inokulasi, dosis aplikasi, serta sistem monitoring yang praktis dan ekonomis. Pengembangan konsorsium mikroba sintetik, teknologi immobilisasi sel, dan integrasi dengan metode remediasi lain seperti fitoremediasi juga perlu dieksplorasi untuk meningkatkan efektivitas sistem bioremediasi secara keseluruhan. Aspek regulasi dan kebijakan terkait biosafety perlu mendapat perhatian dengan penyusunan standar keamanan, pedoman aplikasi, dan mekanisme perizinan yang jelas. Pembentukan konsorsium penelitian yang melibatkan akademisi, industri, dan pemerintah serta program capacity building perlu dilakukan. Studi jangka panjang mengenai dampak ekologi dan diseminasi hasil penelitian kepada masyarakat juga perlu ditingkatkan untuk mendorong implementasi teknologi bioremediasi merkuri secara lebih luas di Indonesia dalam mendukung pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan.

Daftar Pustaka

- Barkay, T., Miller, S. M., & Summers, A. O. (2003). Bacterial mercury resistance from atoms to ecosystems. *FEMS Microbiology Reviews*, 27(2-3), 355-384. [https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(03\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(03)00046-9). (n.d.).
- Beckers, F., & Rinklebe, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(9), 693-794. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Dash, H. R., & Das, S. (2012). Bioremediation of mercury and the importance of bacterial mer genes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 75, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.07.023>
- Irawati, W., Parhusip, A. J. N., Christian, S., & Yuwono, T. (2017). The reduction of mercury vapor (Hg^0) using mercury resistant bacteria. *Biotropia*, 24(1), 1-10. <https://doi.org/10.11598/btb.2017.24.1.418>
- Kocman, D., Wilson, S. J., Amos, H. M., Telmer, K. H., Steenhuisen, F., Sunderland, E. M., ... & Selin, N. E. (2017). Toward an assessment of the global inventory of present-day mercury releases to freshwater environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), 138. <https://doi.org/10.3390/ijerph14020138>
- Kumar, R., Nongkhilaw, M., Acharya, C., & Joshi, S. R. (2011). Uranium (U)-tolerant bacterial diversity from U ore deposit of domiasiat in North-East India and its prospective utilisation in bioremediation. *Microbes and Environments*, 28(1), 33-41. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME12131>

- Kurniawan, A., & Mukono, J. (2018). Isolasi dan karakterisasi bakteri resisten merkuri dari tanah tercemar di area pertambangan emas tradisional Kalimantan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 17(2), 89-96. <https://doi.org/10.14710/jkli.17.2.89-96>
- Malik, A. (2004). Metal bioremediation through growing cells. *Environment International*, 30(2), 261-278. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.08.001>
- Ojuederie, O. B., & Babalola, O. O. (2017). Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1504. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>
- Palleroni, N. J. (2015). *Pseudomonas*. In *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria* (pp. 1-1). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.gbmo1210>
- Pardo, R., Herguedas, M., Barrado, E., & Vega, M. (2003). Biosorption of cadmium, copper, lead and zinc by inactive biomass of *Pseudomonas putida*. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 376(1), 26-32. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-1843-z>
- Rasmussen, L. D., Zawadsky, C., Binnerup, S. J., Øregaard, G., Sørensen, S. J., & Kroer, N. (2008). Cultivation of hard-to-culture subsurface mercury-resistant bacteria and discovery of new merA gene sequences. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(12), 3795-3803. <https://doi.org/10.1128/AEM.00049-08>
- Safitri E.S., & Yulianti E. (2012). PEMANFAATAN BIJI KELOR (*Moringa oleifera* Lamk.) SEBAGAI BIOFLOKULAN LOGAM BERAT Hg, Pb DAN Cr PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI KERAMIK DINOYO MALANG. <http://ejournal.uin-malang.ac.id/index.php/lemlit/article/view/2033>
- Sari, D. P., & Setiadi, T. (2019). Bioremediasi merkuri menggunakan bakteri indigenous *Pseudomonas* sp. dari area pertambangan emas tradisional. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 25(1), 45-54. <https://doi.org/10.5614/jtl.2019.25.1.5>
- Setyowati, M., Mulya, K., & Sjahrizal, R. (2019). Efektivitas bioremediasi merkuri oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa* pada limbah cair industri. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 14(2), 112-121. <https://doi.org/10.23955/rkl.v14i2.13452>
- Singh, R., Singh, P., & Sharma, R. (2021). Microorganism as a tool of bioremediation technology for cleaning environment: A review. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 80(1), 1-12. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2014/v80i1/55085>
- Widyaningsih, S., Hartati, R., & Nugroho, A. P. (2020). Efektivitas konsorsium bakteri *Pseudomonas* sp. dalam bioremediasi limbah cair industri mengandung merkuri. *Jurnal Biologi Indonesia*, 16(2), 215-224. <https://doi.org/10.47349/jbi/16022020/215>
- Yunus, I. S., Wiyono, T., & Krisanti, M. (2016). Aktivitas enzim merkuri reduktase pada bakteri *Pseudomonas aeruginosa* indigenous Indonesia. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*, 10(1), 23-30. <https://doi.org/10.14203/jmi.v10i1.2016.23-30>