

Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya)

Dwi Retno Rahayu dan Sarwoko Mangkoedihardjo
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sarwoko@enviro.its.ac.id

Abstrak—Pencemaran lingkungan terjadi hampir di semua negara di dunia. Kegiatan industri menyebabkan pencemaran lingkungan dalam bentuk pencemaran air, tanah dan udara. Salah satu pencemar di perairan adalah logam berat yang berasal dari pertambangan, peleburan logam, dan industri lainnya. Pencemar logam berat telah menyebabkan terjadinya penurunan kualitas air dan sedimen di badan air seperti sungai, danau dan waduk. Logam berat dapat terakumulasi pada tubuh biota di perairan, yang mana dapat masuk kedalam tubuh manusia jika dikonsumsi dan akan menyebabkan gangguan kesehatan. Diperlukan adanya metode dalam meremediasi polutan logam berat di perairan. Dipilihlah metode bioaugmentasi sebagai cara untuk menurunkan konsentrasi logam berat di perairan. Metode ini dipilih karena operasionalnya yang mudah, ramah lingkungan, dan dapat meremediasi dalam jangka waktu yang lama. Mikroorganisme yang digunakan dalam metode bioaugmentasi ini adalah bakteri. Bakteri merupakan mikroorganisme yang dapat menguraikan pencemar dari senyawa toksik menjadi tidak toksik. Bakteri dapat bertahan hidup di kondisi lingkungan yang ekstrem salah satunya adalah suhu yang tinggi. Studi kasus di wilayah Krueng Sabee, Kabupaten Aceh Jaya menunjukkan bahwa logam berat merkuri (Hg) telah mencemari sungai Krueng Sabee dimana logam berat merkuri (Hg) sudah terakumulasi pada biota air yang terdapat di sungai tersebut. Metode dalam mengurangi konsentrasi logam berat merkuri (Hg) adalah bioaugmentasi dengan pemanfaatan konsorsium atau kultur campuran dari tiga jenis bakteri yaitu *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Citrobacter freundii*. Jenis bakteri penyusun dan waktu degradasi berpengaruh terhadap kemampuan reduksi merkuri (Hg). Gabungan dari beberapa bakteri pendegradasi yang sesuai dapat meningkatkan potensi reduksi merkuri (Hg) pada sedimen air tercemar semakin tinggi.

Kata Kunci—Bakteri, Bioaugmentasi, Logam Berat, Wilayah Perairan.

I. PENDAHULUAN

PENCEMARAN lingkungan yang terjadi di hampir semua negara diakibatkan oleh beberapa faktor seperti kegiatan industri, kegiatan sarana transportasi, kegiatan domestik, dan kegiatan yang dilakukan manusia lainnya. Kegiatan industri menyebabkan kerusakan lingkungan dalam bentuk pencemaran air, tanah dan udara yang tidak menguntungkan bagi kehidupan manusia, hewan dan tumbuhan. Akibat dari pencemaran lingkungan ini, selain akan merusak ekosistem juga dapat memberikan dampak yang merugikan terhadap kesehatan manusia. Pencemaran pada wilayah perairan dapat disebabkan oleh dua jenis polutan, yaitu bahan yang menyebabkan eutrofikasi dan bahan beracun yang menyebabkan kerusakan pada organisme air. Logam berat

adalah bahan beracun yang dapat menyebabkan kerusakan pada organisme akuatik. Sumber pencemaran logam berat sebagian besar berasal dari pertambangan, peleburan logam, industri lainnya, dan juga dapat berasal dari limbah domestik yang menggunakan logam, serta lahan pertanian yang menggunakan pupuk yang mengandung logam [1]. Kontaminasi bahan pencemar logam berat telah menyebabkan terjadinya penurunan kualitas air dan sedimen yang signifikan pada perairan seperti sungai, danau dan waduk [2].

Kasus pencemaran lingkungan di perairan oleh logam berat di Indonesia telah banyak terjadi, salah satunya yaitu kasus pencemaran logam berat merkuri di sungai Krueng Sabee, Kabupaten Aceh Jaya. Merkuri adalah logam berat yang dapat menimbulkan berbagai masalah kesehatan dan menyebabkan kematian makhluk hidup. Di Indonesia, permasalahan merkuri semakin berkembang dengan meningkatnya aktivitas penambangan emas ilegal yang dilakukan oleh masyarakat atau industri kecil. Pembuangan limbah merkuri dilakukan secara ilegal pada sungai-sungai atau tanah di sekitar tempat dilakukannya penambangan emas, sehingga menimbulkan dampak pencemaran pada lingkungan tersebut [3]. Permasalahan limbah merkuri di Provinsi Aceh terjadi sejak tahun 2007 karena adanya kegiatan penambangan emas ilegal seperti yang terjadi di Krueng Sabee. Akibat dari penambangan emas ilegal ini telah menyebabkan dampak pencemaran air dan sedimen yang terjadi di sungai Krueng Sabee yaitu matinya ribuan spesies ikan akibat tercemar oleh logam berat merkuri [4]. Perhatian pada kuantitas dan kualitas limbah yang dihasilkan dan dibuang ke sungai menunjukkan perlunya strategi untuk mengatasi tantangan kualitas air dan sedimen. Diperlukan suatu cara untuk dapat meminimalkan dampak negatif yang timbul dari logam berat merkuri tersebut. Salah satu alternatif pengolahan logam berat yang dapat diterapkan adalah bioremediasi. Bioremediasi merupakan proses degradasi atau penyisihan kontaminan lingkungan dengan memanfaatkan makhluk hidup yaitu mikroorganisme dalam upaya mereduksi logam berat termasuk merkuri, baik secara in-situ maupun ex-situ. Mikroorganisme tersebut beradaptasi dengan lingkungannya melalui beberapa metode seperti: adsorpsi, oksidasi, dan reduksi [5].

Salah satu teknologi remediasi dengan penambahan mikroorganisme sejenis atau berbeda dikenal sebagai bioaugmentasi. Bioaugmentasi merupakan cara peningkatan proses biodegradasi melalui penambahan mikroorganisme pada lingkungan atau media tercemar [6]. Bioaugmentasi

dapat meningkatkan kapasitas media tercemar dengan kemampuan degradasi polutan oleh mikroorganisme dengan mengubah pencemar dari senyawa toksik menjadi tidak toksik sehingga dapat mengurangi dampaknya terhadap lingkungan [7]. Bioaugmentasi dipilih karena merupakan alternatif penyisihan kontaminan yang efektif, murah, mudah dilakukan, dan ramah lingkungan karena tidak menambahkan bahan kimia yang bisa mencemari lingkungan. Salah satu mikroorganisme yang dapat digunakan untuk bioaugmentasi logam berat merkuri adalah bakteri. Bakteri merupakan sel prokariotik, uniseluler, bereproduksi dengan membelah diri, dan habitatnya beragam. Bakteri memiliki fungsi mendegradasi yaitu menurunkan, memecahkan, serta menguraikan rangkaian kompleks menjadi lebih sederhana [8]. Teknik bioaugmentasi sangat cocok digunakan untuk menghilangkan pencemar logam berat merkuri di dalam sedimen sungai dengan melakukan penambahan mikroorganisme berupa bakteri.

Berdasarkan penjelasan tersebut, maka disusunlah studi literatur terhadap terjadinya pencemaran wilayah perairan oleh logam berat merkuri. Selain itu dikaji pula pencemaran logam berat merkuri di wilayah perairan menggunakan metode bioaugmentasi dengan penambahan bakteri. Studi pustaka ini diharapkan dapat memberikan informasi, uraian, dan analisis tentang pencemaran wilayah perairan oleh logam berat merkuri yang nantinya dilakukan penanganan dengan metode bioaugmentasi menggunakan bakteri yang mana akan dihasilkan pula keuntungan dari berbagai aspek lain. Selanjutnya dari kajian pustaka ini, akan dilakukan studi kasus yang berkaitan dengan bahasan yang telah diulas.

II. METODE PENULISAN

Metode dari penulisan ini yaitu menggunakan studi literatur dengan mengumpulkan serta menganalisis berbagai pustaka. Kajian pustaka dilakukan dengan menelusuri berbagai referensi yang berkaitan dengan masalah pencemaran wilayah perairan oleh logam berat. Selain itu dilakukan pula kajian pustaka yang berkaitan dengan bioaugmentasi oleh bakteri. Jenis pustaka antara lain jurnal, buku, laporan, dan website dengan pokok pembahasan terkait wilayah perairan, logam berat, bioaugmentasi, dan bakteri. Studi kasus yang diambil dalam penulisan ini adalah kasus pencemaran logam berat Hg di wilayah perairan Aceh Jaya tepatnya di sungai Krueng Sabee dengan menganalisis salah satu alternatif penanganan yaitu dengan bioaugmentasi oleh bakteri dari berbagai pustaka yang telah dianalisis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pencemaran Air

Pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan atau komponen lain kedalam air oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya. Indikator atau tanda bahwa air di lingkungan telah tercemar adalah adanya perubahan atau tanda yang dapat diamati melalui adanya perubahan suhu air, perubahan pH atau konsentrasi ion hidrogen, perubahan bau, rasa dan warna air, timbulnya endapan, koloidal, bahan terlarut, adanya mikroorganisme

dan meningkatnya radioaktif lingkungan. Air normal yang dapat digunakan untuk kehidupan pada umumnya tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa [9]. Pencemaran air dapat disebabkan oleh dua jenis polutan, yaitu bahan yang menyebabkan eutrofikasi dan bahan beracun yang menyebabkan kerusakan pada organisme air [1].

B. Logam Berat Hg

Logam berat adalah unsur logam yang mempunyai densitas $>5 \text{ g/cm}^3$ dalam air laut. Logam berat terdapat dalam bentuk terlarut dan tersuspensi. Dalam kondisi alami, logam berat dibutuhkan oleh organisme untuk pertumbuhan dan perkembangan hidupnya. Jika kadar logam berat di suatu perairan terlalu rendah, maka akan terjadi defisiensi terhadap kehidupan organisme, sedangkan apabila logam berat dalam jumlah yang tinggi maka dapat bersifat toksik. Salah satu sifat logam berat adalah sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan [10]. Dari sudut pandang toksikologi, logam berat dapat dibagi dalam 2 jenis, yang pertama adalah logam berat esensial, dimana keberadaannya dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme hidup, namun dalam jumlah yang berlebihan dapat beracun. Contoh logam berat ini adalah Zn, Cu, Fe, Co, Mn dan lain sebagainya. Jenis kedua adalah logam berat tidak esensial atau beracun, dimana keberadaannya dalam tubuh belum diketahui manfaatnya atau bahkan dapat bersifat racun, seperti Hg, Cd, Pb, Cr dan lain-lain. Logam berat ini dapat mempengaruhi kesehatan bagi manusia tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh [11].

Merkuri (Hg) adalah logam berat yang diketahui toksisitasnya. Merkuri (Hg) memiliki tiga bentuk utama di lingkungan yaitu uap berupa unsur Hg, garam Hg anorganik berupa Hg^+ dan Hg^{2+} , dan Hg organik seperti metil merkuri dan dimetil merkuri [12]. Air raksa atau merkuri (Hg) adalah logam yang ada secara alami, merupakan satu-satunya logam yang pada suhu kamar berwujud cair. Logam murni berwarna keperakan/putih keabu-abuan, cairan tak berbau dan mengkilap. Bila dipanaskan sampai suhu 357°C , Hg akan menguap. Merkuri (Hg) adalah unsur renik pada kerak bumi hanya sekitar 0,08 mg/l dan logam ini banyak tertimbun di daerah pertambangan [13]. Merkuri (Hg) dianggap logam berat paling beracun di antara logam berat lainnya yang ada di lingkungan. Merkuri (Hg) dilepaskan ke lingkungan dari kegiatan industri seperti farmasi, kertas dan pengawet pulp, industri pertanian, dan klorin serta industri produksi soda kaustik [14]. Merkuri (Hg) merupakan unsur yang sangat beracun yang banyak tersebar di atmosfer, litosfer, dan air permukaan. Merkuri (Hg) dapat masuk ke lingkungan perairan karena aktivitas penambangan, residu pembakaran batubara, limbah pabrik, fungisida, pestisida, limbah rumah tangga dan sebagainya [15].

C. Pencemaran Logam Berat Hg di Air

Keberadaan logam berat di wilayah perairan dapat memberikan dampak negatif bagi kehidupan organisme, baik organisme air maupun darat dalam tingkat individu sampai pada komunitas. Adanya logam berat di badan air dikarenakan adanya pemanfaatan logam berat yang menyisakan limbah dan dibuang ke lingkungan, misalnya merkuri (Hg) yang dimanfaatkan sebagai bahan pelarut emas. Merkuri (Hg) dapat terakumulasi dalam tubuh organisme air.

Tabel 1.
Faktor yang Mempengaruhi Bioaugmentasi

Faktor	Deskripsi
Kematian sel pada proses inokulasi	Karena perubahan kondisi lingkungan yang ekstrem
Kematian sel setelah proses inokulasi	Penipisan nutrisi atau toksisitas yang disebabkan oleh kontaminan
Ketersediaan nutrisi	Kompetisi antar mikroba untuk mendapatkan nutrisi
Gangguan organisme lain	Populasi bakteri dapat bersaing dengan pertumbuhan protozoa
pH	pH yang tinggi dapat menghambat proses degradasi
Temperatur	Efek dari pertumbuhan mikroba dan proses degradasi
Kelembapan	Kelembapan yang rendah mempengaruhi pertumbuhan mikroba dan aerasi tanah lebih tinggi

Tabel 2.
Kelebihan dan Kekurangan Bioaugmentasi

Kelebihan	Kekurangan
Meningkatkan dan mempercepat bioremediasi	Membutuhkan pemantauan yang intensif.
Tidak menambahkan bahan kimia yang berbahaya (ramah lingkungan)	Membutuhkan waktu yang lebih lama daripada pilihan pengolahan lainnya.
Lebih sedikit energi yang dibutuhkan dalam penerapannya	Terbatas pada senyawa yang dapat terurai oleh mikroorganisme.
Biaya yang dibutuhkan lebih murah	
Bisa dilakukan secara in-situ	

Jika organisme air seperti ikan dan kerang yang ada di sungai terakumulasi oleh merkuri dan dikonsumsi oleh manusia, maka merkuri akan memasuki tubuh manusia dan menyebabkan gangguan yang merugikan [16]. Paparan merkuri pada ikan masuk melalui jalur rantai makanan. Pertama, ion merkuri dimakan oleh organisme planktonik. Plankton dimakan oleh ikan-ikan kecil, udang dan biota lainnya. Kemudian, ikan kecil tersebut dimakan oleh ikan yang lebih besar, dan seterusnya sampai tingkatan puncak dari rantai makanan yang ada dalam tatanan perairan. Puncak dari rantai makanan ini yaitu manusia yang kemudian mengkonsumsi baik ikan maupun biota lainnya yang telah mengakumulasi atau terkontaminasi oleh senyawa merkuri [17].

Logam berat Hg sangat mudah terakumulasi dan mengendap. Logam berat Hg yang semula terlarut dalam air sungai dapat diadsorpsi oleh partikel halus dan dibawa ke muara oleh aliran air sungai. Air sungai tersebut bertemu dengan arus pasang di muara, sehingga partikel halus mengendap di muara sungai. Hal inilah yang menyebabkan kadar logam berat Hg dalam sedimen lebih tinggi dibandingkan dalam air. Secara umum, muara sungai mengalami proses sedimentasi, yaitu logam yang sulit larut mengalami proses pengenceran yang berada di kolom air lama kelamaan akan turun ke dasar dan mengendap dalam sedimen. Kadar logam yang cukup tinggi dapat dilihat dari nilai pH yang relatif bersifat basa (pH = 7,40 - 8,59) di lokasi

Tabel 3.
Baku Mutu logam Hg pada Air Laut

Peruntukkan	Satuan	Logam Hg
Perairan	mg/l	0,003
Pelabuhan	mg/l	0,002
Wisata Bahari	mg/l	0,001
Kehidupan Biota Laut	mg/l	0,001

Tabel 4.
Baku Mutu Logam Hg dalam Sedimen

Standar Kualitas Sedimen	Rentang	Satuan	Logam Hg
EPA Sediment Quality	Tidak tercemar	mg/kg	<0,18
	Tercemar ringan	mg/kg	0,18-0,64
	Sangat tercemar	mg/kg	>0,64

Tabel 5.
Studi Terpilih yang Melibatkan Kemampuan Reduksi Merkuri oleh Bakteri Kultur Tunggal dan Campuran

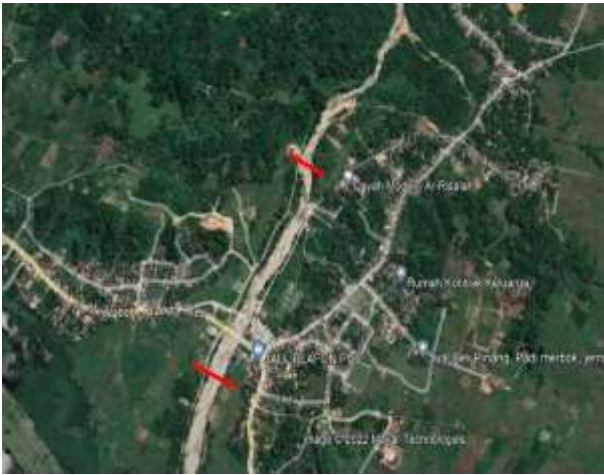
No	Bakteri	% Reduksi
1	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	60,1%
2	<i>Actinomyces viscosus</i>	53,8%
3	Konsorsium <i>Pseudomonas stutzeri</i> dan <i>Actinomyces viscosus</i>	74,5%
4	Konsorsium <i>Pseudomonas maltophilia</i> dan <i>Pseudomonas stutzeri</i>	84%
5	Konsorsium <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , dan <i>Citrobacter freundii</i>	99%

tempat logam tersebut sulit larut dan mengendap ke dasar perairan [18].

D. Bakteri

Bakteri merupakan sel prokariotik, uniseluler, bereproduksi dengan membelah diri, dan habitatnya beragam. Bakteri memiliki fungsi mendegradasi yaitu menurunkan, memecahkan, serta menguraikan rangkaian kompleks menjadi lebih sederhana [8]. Bakteri merupakan sel prokariotik yang sel-selnya memiliki ciri berbentuk kokus, batang, atau spiral. Bakteri memiliki ukuran diameter antara 0,5 – 1,0 µm dan panjang 1,5 – 2,5 µm. Beberapa spesies atau genera dapat tumbuh pada suhu 0°C, ada pula yang tumbuh baik pada sumber air panas yang suhunya 90°C atau lebih. Kebanyakan tumbuh pada berbagai suhu diantara kedua suhu ekstrem ini. [19]. Faktor-faktor pertumbuhan bakteri adalah: Semua bakteri membutuhkan substrat sebagai sumber karbon dan energi, Setiap bakteri hanya dapat tumbuh pada temperatur dengan rentang tertentu, Derajat keasaman (pH) mempengaruhi kemampuan bakteri untuk mengadakan transpor membran sel dan kesetimbangan dari reaksi katalis. Bakteri mengurai senyawa organik polutan logam berat dengan cara menangkap/mengambil senyawa tersebut ke dalam sel dan memanfaatkan enzim intraseluler. Dalam hal ini, difusi dengan polutan dibatasi oleh ukuran molekul, dinding sel, toksisitas senyawa tertentu yang akan mematikan bakteri [16].

Ada beberapa jenis bakteri yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan untuk menyerap logam berat, diantaranya dari genus *Pseudomonas*, *Leptothrix*, *Klebsiella*, *Citrobacter* dan *Bacillus*. Di antara genus bakteri tersebut hanya genus



Gambar 1. Segmen sungai yang digunakan dalam bioaugmentasi sepanjang 1 km dengan garis merah adalah tanda batas segmen.

Pseudomonas dan *Bacillus* yang diakui paling resisten terhadap logam berat di lingkungan [20].

Menggunakan konsorsium bakteri daripada kultur murni untuk bioremediasi lebih menguntungkan karena memberikan keragaman metabolik dan ketahanan yang dibutuhkan untuk aplikasi di lapangan. Penambahan konsorsium bakteri dapat meningkatkan laju degradasi yang signifikan [21].

E. Bioremediasi

Bioremediasi adalah proses degradasi kontaminan menjadi bentuk yang lebih aman terhadap lingkungan menggunakan makhluk hidup. Proses tersebut melibatkan bakteri, jamur, maupun tumbuhan alami yang dapat mendegradasi senyawa berbahaya terhadap lingkungan. Bioremediasi merupakan alternatif efektif untuk menyisihkan kontaminan melalui proses biologis [2]. Berdasarkan lokasinya, teknologi bioremediasi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu bioremediasi ex-situ dan in-situ. Bioremediasi ex-situ merupakan proses bioremediasi dengan cara memindahkan material yang terkontaminasi dari lokasi pencemaran ke tempat yang lain untuk diolah lebih lanjut. Penggunaan bioreaktor, pengolahan lahan (landfarming), pengomposan dan beberapa bentuk perlakuan fase padat lainnya adalah contoh dari teknologi ex-situ. Bioremediasi in-situ merupakan proses bioremediasi yang dilakukan pada lokasi kontaminasi tanpa melakukan pemindahan material yang terkontaminasi dari lokasi pencemaran [22].

Terdapat 2 pendekatan utama dalam bioremediasi logam berat yaitu bioaugmentasi yang merupakan penambahan mikroorganisme pendegradasi logam berat untuk membantu proses degradasi, dan biostimulasi yaitu penambahan nutrisi untuk menstimulasikan pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi. Bioaugmentasi dilakukan dengan menambahkan mikroorganisme dalam lingkungan tercemar untuk mendegradasi kontaminan [23].

Biostimulasi dilakukan karena proses biodegradasi hanya dapat terpenuhi bila seluruh kebutuhan dasar mikroorganisme terpenuhi. Biostimulasi berarti menyediakan kebutuhan mikroorganisme sehingga mikroorganisme dapat hidup dan melakukan proses biodegradasi [24]. Dengan demikian, dalam bioaugmentasi juga dibutuhkan biostimulasi agar mikroorganisme dapat tetap hidup dan mendegradasi kontaminan dengan baik.

F. Penurunan Konsentrasi Logam Berat Hg dengan Bioaugmentasi dengan Bakteri

Bioaugmentasi merupakan teknik pemanfaatan mikroorganisme yang memiliki kemampuan mendegradasi logam berat pada lingkungan. Bioaugmentasi oleh bakteri merupakan upaya meningkatkan kemampuan biodegradasi polutan pada lahan tercemar dengan menambahkan kultur tunggal atau konsorsium bakteri yang sesuai. Keberhasilan bioaugmentasi juga dipengaruhi oleh jenis bakteri yang digunakan [25]. Bakteri yang paling baik digunakan adalah yang terseleksi dari hasil isolasi lokasi tercemar yang telah dibiakkan di laboratorium. Bioaugmentasi dapat digunakan untuk menangani bahan pencemar yang terdegradasi sangat lambat dan tingginya konsentrasi bahan pencemar yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri [26]. Beberapa faktor yang mempengaruhi proses bioaugmentasi ditunjukkan pada Tabel 1. Karena bioaugmentasi merupakan penambahan mikroba pada media tercemar, maka ada kemungkinan terjadinya kematian baik saat proses maupun sesudah inokulasi yang disebabkan oleh kurangnya nutrisi atau ketidakmampuan mikroba beradaptasi pada lingkungan ekstrem. Pertumbuhan mikroba bergantung pada nutrisi dan kondisi lingkungan dimana mikroba tersebut berada. Ketersediaan nutrisi menjadi faktor penting karena digunakan sebagai sumber energi. Kelembapan, derajat keasaman (pH), dan temperatur lingkungan yang tidak sesuai kondisi ideal mikroba dapat menghambat pertumbuhan dan degradasi polutan.

Teknik penambahan bakteri dalam bioaugmentasi dapat dilakukan melalui proses isolasi bakteri, pengujian bakteri dalam mendegradasi zat pencemar, identifikasi bakteri dengan cara seperti pengamatan morfologi sel, pewarnaan gram, dan uji biokimia, kemudian perbanyakan bakteri sebelum dimasukkan ke media tercemar. Setelah didapatkan isolat yang diinginkan, uji degradasi, dan identifikasi bakteri, selanjutnya adalah membuat perbanyakan bakteri yang merupakan proses untuk memproduksi inokulum. Pendekatan terbaik untuk bakteri bioaugmentasi adalah dengan menginokulasi bakteri yang telah dipilih sebelumnya dari lokasi yang terkontaminasi karena lebih mungkin untuk bertahan hidup dan berkembang biak ketika dimasukkan kembali ke lingkungan yang tercemar [27].

Penurunan konsentrasi merkuri oleh bakteri terjadi karena bakteri yang resisten merkuri memiliki gen resisten merkuri, *merOperon*. Mekanisme resisten terhadap merkuri didasarkan pada adanya sekelompok *merOperon* yang memungkinkan bakteri untuk mereduksi ion logam merkuri yang toksik Hg^{2+} ke dalam bentuk merkuri yang volatil Hg^0 melalui mekanisme reduksi enzimatis. *MerOperon* terdiri dari sekelompok gen yang mengkode protein-protein dengan fungsi regulasi, transportasi, dekomposisi dan reduksi merkuri. Struktur *merOperon* terdiri dari gen metaloregulator (*merR*), gen transpor merkuri (*merT*, *merP*, *merC*), gen merkuri reduktase (*merA*), dan organomercuri liase (*merB*) [28].

Mekanisme reduksi Hg^{2+} secara enzimatis terjadi melalui beberapa tahapan. Proses diawali dengan masuknya ion Hg^{2+} ke dalam sel. *MerP* merupakan protein periplasma yang berfungsi untuk menyimpan sementara Hg^{2+} di periplasma kemudian melewatkan ion Hg^{2+} ke *transporter inner membrane* yaitu *merT* atau *merC*. Dari *merT*, ion Hg^{2+} akan

menuju merkuri reduktase (*merA*) melalui proses reaksi pertukaran ligan. Di *merA* Hg^{2+} akan direduksi menjadi Hg^0 . Merkuri reduktase (*merA*) mengkatalisis reduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 yang akhirnya Hg^0 berdifusi di lingkungan sel untuk selanjutnya dikeluarkan dari sel (Tabel 2) [29].

G. Baku Mutu Logam Berat Hg di Wilayah Perairan

Indonesia belum memiliki baku mutu yang spesifik mengenai sedimen di kawasan perairan. Indonesia hanya memiliki baku mutu air laut yang tertulis dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang baku mutu air laut, dimana batas kadar merkuri (Hg) ditunjukkan pada Tabel 3.

Baku mutu untuk sedimen yang digunakan dari beberapa sumber karena di Indonesia belum terdapat peraturan tentang baku mutu sedimen. Baku mutu sedimen dari beberapa negara ditunjukkan pada Tabel 4.

H. Penerapan Penyisihan Logam Berat Hg di sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya

Permasalahan merkuri di sungai Krueng Sabee saat ini semakin berkembang seiring dengan meningkatnya aktivitas penambangan emas ilegal oleh masyarakat atau industri kecil lainnya. Pembuangan limbah merkuri dilakukan secara ilegal pada sungai atau tanah di sekitar tempat dilakukannya penambangan emas, sehingga menyebabkan pencemaran pada lingkungan tersebut. Nilai TSS merupakan salah satu bagian yang berperan dalam menentukan kualitas lingkungan suatu perairan. Nilai TSS yang tinggi menunjukkan tingkat pencemaran yang tinggi pula [30]. Nilai TSS sungai Krueng Sabee berkisar antara 13,41-13,96 ppm. Batas maksimal toleransi TSS pada perairan adalah tidak melebihi 20 mg/l menurut KEPMEN LH No. 51 Tahun 2004 sehingga TSS di sungai Krueng Sabee termasuk ke dalam kategori cukup [31]. Suhu lingkungan perairan berdampak pada kelarutan logam berat dalam air. Pembentukan ion logam berat meningkat pada suhu yang lebih tinggi sehingga akan meningkatkan pengendapan logam melalui adsorpsi logam oleh sedimen. Suhu juga mempengaruhi kecepatan pertumbuhan bakteri. Pertumbuhan bakteri terjadi pada suhu dengan kisaran kira-kira 30^o C. Suhu sungai Krueng Sabee berkisar antara 26,93 – 28,32^oC yang artinya tidak perlu dilakukan pengkondisian suhu. Nilai pH sedimen di sungai Krueng Sabee rata-rata sebesar 6,67 – 7,70 [32]. Bakteri yang hidup di lingkungan perairan biasanya memerlukan suatu pH optimum (6 - 9) untuk tumbuh optimal [33]. Nilai pH di sungai Krueng Sabee masuk ke dalam rentang pH optimum untuk pertumbuhan bakteri.

Kandungan merkuri (Hg) dalam sedimen Krueng Sabee adalah 0,76 mg/kg, sedangkan pada sampel air sebesar 0,0034 mg/l [4], [32]. Kondisi ini telah melewati baku mutu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4, yang artinya sungai Krueng Sabee telah tercemar oleh logam berat merkuri. Kandungan oksigen terlarut di sungai Krueng Sabee sebesar 5,2 - 5,7 mg/l dimana minimumnya adalah 2 ppm untuk mendukung kehidupan organisme. Pada umumnya, bakteri pendegradasi logam berat tergolong dalam mikroorganisme aerob, sehingga adanya keberadaan oksigen sangat penting dalam proses degradasi. Kecepatan arus mempengaruhi persebaran bakteri di sedimen yang digunakan dalam proses bioaugmentasi di Sungai Krueng Sabee. Arus di perairan juga mempengaruhi laju difusi

oksigen dari udara bebas ke dalam perairan. Kecepatan arus di sungai Krueng Sabee yaitu sebesar 0,65 m/detik dimana angka tersebut tergolong ke dalam kategori baik [31].

Bioaugmentasi dilakukan dengan penambahan bakteri luar yang telah teruji agar laju penguraian polutan dapat meningkat. Kinerja bakteri kultur campuran (*mix culture*) lebih baik dan lebih stabil dibandingkan dengan bakteri kultur tunggal. Penggunaan kultur campuran lebih baik dalam mendegradasi polutan karena besar reduksi merkuri oleh bakteri kultur campuran lebih tinggi daripada bakteri kultur tunggal dimana penggunaan kultur campuran dalam proses bioremediasi dilakukan oleh populasi bakteri yang lebih tinggi sehingga kemampuan mendegradasi polutan lebih baik dalam waktu yang lebih cepat [34]. *Mix culture* memiliki persentase degradasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *single culture* dikarenakan dalam keadaan bersama, bakteri memiliki fungsi metabolisme yang saling melengkapi. Kehadiran bakteri lainnya meningkatkan reduksi merkuri yang lebih tinggi daripada bakteri tunggal. [35]. Kemampuan reduksi merkuri di beberapa penelitian oleh beberapa bakteri ditunjukkan pada Tabel 5.

Pada bioaugmentasi ini, bakteri yang digunakan adalah kultur campuran dari bakteri *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Citrobacter freundii* yang sesuai pada Tabel 5 mempunyai besar reduksi merkuri sebesar 99% dan dalam waktu 81 hari [35]. Bakteri ini dipilih dikarenakan ketiganya merupakan bakteri yang bisa ditemukan di berbagai media termasuk air dan sedimen perairan. *Pseudomonas putida* memiliki kemampuan metabolisme yang sangat baik, tahan terhadap kondisi lingkungan yang beragam, mampu menghilangkan merkuri di lingkungan terkontaminasi, dan menjadikannya spesies yang menjanjikan untuk bioremediasi merkuri [36]. *Pseudomonas putida* bisa tumbuh dan bertahan hidup ada pH 5,5 – 8,5 dan memiliki suhu pertumbuhan optimum 25-30^oC [35]. Kemudian untuk bakteri *Pseudomonas aeruginosa* memiliki kemampuan untuk menghilangkan merkuri secara efisien dari sedimen di perairan, tumbuh dengan baik pada suhu 25-37^oC dan pH 7-9 [37]. *Citrobacter freundii* dipilih karena sangat potensial untuk digunakan dalam bioremediasi merkuri dari lingkungan alam. Bakteri ini dapat tumbuh dengan optimal ketika pH netral atau sedikit basa dan bisa tumbuh dengan suhu maksimal 90^oC [38]. Maka ketiga bakteri tersebut bisa tumbuh dengan optimal di sungai Krueng Sabee.

Pada skenario ini, bakteri ditambahkan ke sedimen dengan cara dimasukkan melalui pipa di bagian tepi sungai, dimana pipa tersebut mencapai sedimen agar bakteri yang ditambahkan dapat sampai di sedimen sungai. Selain itu, akan dibuat bendung yang merupakan pembatas yang dibangun melintasi sungai dimana dalam hal ini bendung dibuat untuk membatasi segmen yang digunakan dalam bioaugmentasi. Karena media yang digunakan dalam skenario ini yaitu sedimen sungai, maka keberadaan bendung ini berfungsi untuk mencegah bergesernya sedimen yang ada pada segmen sungai untuk proses bioaugmentasi.

Proses bioaugmentasi oleh kultur campuran bakteri *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Citrobacter freundii* diketahui dapat menurunkan konsentrasi merkuri sebesar 99% dan dilakukan dalam waktu 81 hari. Selama 81 hari ini diperlukan adanya *monitoring*

(pemantauan) untuk memastikan bahwa bioaugmentasi telah berlangsung dan ditandai dengan kandungan merkuri di sungai Krueng Sabee menurun. Pemantauan dilakukan dengan mengambil sampel sedimen di beberapa titik pada segmen sungai Krueng Sabee yang digunakan dalam proses bioaugmentasi untuk diketahui kandungan merkuri pada sedimen sungai saat pengambilan sampel tersebut.

Pada studi kasus sungai Krueng Sabee ini, digunakan segmen sungai yang tercemar merkuri dengan konsentrasi yang paling tinggi dan melewati pemukiman penduduk yang artinya pencemaran pada daerah tersebut juga akan mempengaruhi aktivitas penduduk di sepanjang sungai tersebut karena sungai Krueng Sabee masih dijadikan sebagai sumber kehidupan untuk dimanfaatkan air dan biota air yang ada di dalamnya oleh masyarakat sekitar sungai. Segmen sungai tersebut memiliki panjang 1 km dengan lebar yang digunakan yaitu rata-rata 40 m sehingga luas zona segmen yang didapatkan untuk proses bioaugmentasi adalah sebesar 40.000 m². Segmen sungai yang digunakan dalam proses bioaugmentasi ditunjukkan pada Gambar 1.

Berdasarkan luas zona yang telah didapatkan maka dapat dicari perhitungan beban logam berat pada sedimen sungai tersebut. Konsentrasi logam berat Hg pada sedimen Sungai Krueng Sabee adalah sebesar 0,76 mg/kg [4]. Logam berat merkuri (Hg) dapat masuk ke dasar perairan atau terakumulasi pada sedimen dengan kedalaman 15 cm. Berat jenis sedimen adalah 1650 kg/m³ [39]. Volume dan massa sedimen pada segmen dengan luas 40.000 m² masing-masing didapatkan sebesar 6000 m³ dan 9.900.000 kg. Selanjutnya, dilakukan perhitungan beban pencemar dan didapatkan beban pencemar untuk segmen tersebut adalah sebesar 7.524 gr Hg.

Bioestimulasi dilakukan dengan memberikan tambahan nutrisi (C, N, P) untuk menstimulasi perkembangbiakan dari bakteri di lingkungan sehingga bakteri mampu berperan maksimal dalam mereduksi polutan. Selanjutnya dicari penambahan nutrisi untuk pertumbuhan bakteri di lingkungan tercemar tersebut. Nutrien merupakan faktor yang berpengaruh besar dalam sintesis dan pertumbuhan sel serta dalam aktivitas enzim yang dihasilkan oleh bakteri untuk mendegradasi polutan. Unsur penting di perairan yang mempengaruhi ketersediaan nutrien yang dibutuhkan mikroorganisme perairan adalah karbon, nitrogen, dan fosfor. Kandungan C (dalam bentuk karbon organik), N (dalam bentuk nitrat) dan P (dalam bentuk fosfat) berfungsi sebagai pembatas kesuburan di sedimen perairan. Total karbon organik dalam sedimen merupakan jumlah karbon terikat dalam senyawa organik yang berasal dari hewan maupun tumbuhan yang membusuk dan kemudian tenggelam ke dasar perairan [40].

Sumber utama nitrat dan fosfat secara alami berasal dari aktivitas domestik dan perairan itu sendiri melalui proses penguraian, pelapukan, dekomposisi organisme dan buangan limbah daratan (domestik, industri, pertanian, peternakan dan sisa pakan) yang diuraikan oleh bakteri menjadi zat hara [41]. Pada dasarnya, semua mikroorganisme membutuhkan karbon sebagai sumber energi untuk aktivitasnya. Nitrat dan fosfat adalah penyusun senyawa-senyawa penting dalam sel yang menentukan aktivitas pertumbuhan mikroorganisme. Ketiga unsur tersebut harus ada dalam rasio yang tepat agar pertumbuhan bakteri optimal [42]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa rasio C:N:P optimum pada proses

biodegradasi adalah 100:5:1 [43]. Tinggi rendahnya kandungan C, N dan P dipengaruhi oleh tekstur sedimen. Semakin kecil ukuran partikel sedimen semakin besar kandungan C, N dan P nya [41]. Penambahan nutrien ini disebut dengan metode biostimulasi. Biostimulasi adalah penambahan nutrien untuk menstimulasikan pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi. Maka ditentukan jumlah penambahan nutrien.

Karbon yang terkandung di dalam sedimen Krueng Sabee 9.900.000 kg adalah sebesar 17% atau 1.683.000 kg. Rasio C:N:P optimum yang digunakan yaitu 100:5:1, maka nitrat yang diperlukan adalah sebesar 84.150 kg dan fosfat yang diperlukan sebesar 16.830 kg. Kandungan nitrat sebenarnya di sedimen sebesar 0,61% atau 60.390 kg maka perlu penambahan sebesar 23.760 kg. Kandungan fosfat sebenarnya di sedimen sebesar 117.809 mg/kg atau 1.166 kg maka perlu penambahan sebesar 15.663 kg. Beberapa limbah dapat dimanfaatkan menjadi bahan organik yang menyediakan unsur C, N dan P. Bahan organik yang dapat digunakan salah satunya berasal dari limbah pertanian yang berupa jerami padi. Melalui proses dekomposisi, jerami padi dapat menghasilkan kompos dengan kadar unsur C, N dan P yang cukup baik yaitu kadar C 35,11%, N 1,86%, dan P 0,31% [44].

Kemudian ditambahkan bakteri dengan terlebih dahulu melakukan perhitungan jumlah bakteri/inokulum yang akan ditambahkan untuk melakukan bioremediasi sedimen tercemar sebanyak 9.900.000 kg. Perhitungan dilakukan untuk penambahan kultur yaitu *mix culture*. *Mix culture* yang terpilih adalah konsorsium bakteri yang terdiri dari *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Citrobacter freundii*. Diketahui sebanyak 0,5 ml masing-masing bakteri diinokulasikan ke dalam 5 gr media sehingga didapatkan 1,5 ml dari ketiga bakteri diinokulasikan ke dalam 15 gr media dengan kerapatan dari masing-masing bakteri yang ditambahkan adalah 10¹² sel / ml. Maka, persentase inokulasi adalah sebesar 10% dan jumlah bakteri yang dibutuhkan untuk menurunkan konsentrasi pencemar sebesar 7.524 gr dalam sedimen 9.900.000 kg adalah sebanyak 990 m³ x 10¹² sel/ml.

Bakteri ditambahkan ke sedimen dengan cara dimasukkan melalui pipa di bagian 2 sisi tepi sungai, dimana pipa tersebut mencapai sedimen agar bakteri yang ditambahkan dapat sampai di sedimen sungai. Penambahan bakteri dilakukan dengan jarak masing-masing pipa 5 m, maka pipa yang dibutuhkan untuk adalah 400 pipa yang artinya terdapat 400 titik penambahan bakteri, dimana setiap titiknya ditambahkan bakteri dengan jumlah 2,475 m³ x 10¹² sel/ml. *Mix culture* bakteri yang digunakan mempunyai waktu degradasi selama 81 hari dan persentase degradasi logam berat merkuri sebesar 99%. Maka dapat dihitung pencemar Hg di akhir proses bioaugmentasi adalah sebesar 75.240 mg dan konsentrasi akhir Hg adalah sebesar 0,0076 mg/kg dimana telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan yaitu sebesar 0,18 mg/kg untuk sedimen. Penggunaan konsorsium bakteri dan waktu degradasi berpengaruh terhadap kemampuan degradasi logam berat merkuri. Hal ini disebabkan karena dalam keadaan bersama, bakteri memiliki fungsi metabolisme yang saling melengkapi dalam suatu ekosistem. Kemungkinan lain adalah karena isolat campuran/*mix culture* menghasilkan enzim yang lebih bervariasi dalam jenis dan

tingkat penguraian serta jumlah yang lebih banyak dibandingkan kultur tunggal sehingga mampu menguraikan polutan logam berat lebih cepat.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada hasil dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan bahwa; (1) Pencemaran logam berat merkuri di sungai Krueng Sabee, Kabupaten Aceh Jaya disebabkan oleh pembuangan limbah merkuri secara ilegal pada sungai di sekitar tempat dilakukannya penambangan emas dan berdampak pada kesehatan manusia karena merkuri dapat terakumulasi di tubuh biota air yang perairannya tercemar logam berat merkuri. Metode untuk mengurangi konsentrasi logam berat merkuri adalah metode bioaugmentasi. (2) Agen pendegradasi yang digunakan dalam bioaugmentasi sedimen tercemar logam berat merkuri adalah bakteri dalam konsorsium (*mix culture*) dengan memperhatikan faktor-faktor yang mempengaruhi bioremediasi seperti pH, suhu, dan nutrisi. *Mix culture* memiliki persentase degradasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *single culture* dikarenakan dalam keadaan bersama, bakteri memiliki fungsi metabolisme yang saling melengkapi. (3) Hasil studi kasus pencemaran merkuri di wilayah sungai Krueng Sabee, Kabupaten Aceh Jaya menyatakan bahwa metode bioaugmentasi dengan teknik in-situ dan adanya penambahan nutrisi merupakan alternatif yang sesuai untuk menurunkan konsentrasi merkuri di sedimen sungai. Skenario penggunaan bakteri sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yaitu menggunakan *mix culture*/konsorsium. Konsorsium yang terpilih adalah bakteri *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Citrobacter freundii* dengan persentase degradasi merkuri sebesar 99% dapat mengurangi pencemar dimana konsentrasi awal adalah 0,76 mg/kg menjadi 0,0076 mg/kg dan sesuai dengan baku mutu untuk sedimen (0,18 mg/kg).

DAFTAR PUSTAKA

- P. Lestari and Y. Trihadiningrum, "The impact of improper solid waste management to plastic pollution in Indonesian coast and marine environment," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 149, 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110505.
- B. Priadie, "Teknik bioremediasi sebagai alternatif dalam upaya pengendalian pencemaran air," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 10, no. 1, p. 38, 2012, doi: 10.14710/jil.10.1.38-48.
- S. R. Fauzi, C. Meutia, and R. A. Fitri, "Bioaugmentasi air tercemar limbah merkuri di Krueng Sabee Aceh Jaya menggunakan isolat *Bacillus Da11*," *J. Penelit. Pertan. BERNAS*, vol. 13, no. 3, pp. 46–54, 2017.
- S. Purnawan, R. Rahman, and S. Karina, "Kandungan merkuri pada substrat dasar di kawasan muara Krueng Sabee, Krueng Panga, dan Krueng Teunom, Kabupaten Aceh Jaya," *J. Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir dan Perikan.*, vol. 6, no. 3, pp. 265–272, 2017, doi: 10.13170/depik.6.3.8108.
- F. R. Shakoori, S. Tabassum, A. Rehman, and A. R. Shakoori, "Isolation and characterization of Cr6+ reducing bacteria and their potential use in bioremediation of chromium containing wastewater," *Pak. J. Zool.*, vol. 42, no. 6, pp. 651–658, 2010.
- R. Andreazza, B. C. Okeke, M. R. Lambais, L. Bortolon, G. W. B. de Melo, and F. A. de Oliveira Camargo, "Bacterial stimulation of copper phytoaccumulation by bioaugmentation with rhizosphere bacteria," *Chemosphere*, vol. 81, no. 9, pp. 1149–1154, 2010, doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.047.
- A. Mrozik and Z. Piotrowska-Seget, "Bioaugmentation as a strategy for cleaning up of soils contaminated with aromatic compounds," *Microbiol. Res.*, vol. 165, no. 5, pp. 363–375, 2010, doi: 10.1016/j.micres.2009.08.001.
- A. Kulshreshtha, R. Agrawal, M. Barar, and S. Saxena, "A review on bioremediation of heavy metals in contaminated water," *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.*, vol. 8, no. 7, pp. 44–50, 2014, doi: 10.9790/2402-08714450.
- W. A. Wardhana, *Dampak Pencemaran Lingkungan*, 1st ed. Yogyakarta: Andi Offset, 2004.
- R. Utami, W. Rismawati, and K. Sapanli, "Pemanfaatan Mangrove untuk Mengurangi Logam Berat di Perairan Utilization of Mangroves to Reduce Heavy Metals in The Waters," *Pros. Semin. Nas. Hari Air Dunia*, vol. 2, no. 1, pp. 141–153, 2018.
- N. I. Said, "metoda penghilangan logam berat (As, Cd, Cr, Ag, Cu, Pb, Ni dan Zn) di dalam air limbah industri," *J. Air Indones.*, vol. 6, no. 2, pp. 136–148, 2018, doi: 10.29122/jai.v6i2.2464.
- R. A. Bernhoft, "Mercury toxicity and treatment: A review of the literature," *J. Environ. Public Health*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/460508.
- P. D. Selid, H. Xu, E. M. Collins, M. S. Face-Collins, and J. X. Zhao, "Sensing mercury for biomedical and environmental monitoring," *Sensors*, vol. 9, no. 7, pp. 5446–5459, 2009, doi: 10.3390/s90705446.
- S. Morais, F. G. e Costa, and M. Lourdes Pereir, "Heavy metals and human health.," *Environ. Heal. Issues Pract.*, vol. 10, no. 1, pp. 227–246, 2012.
- D. Y. Pratiwi, "Dampak pencemaran logam berat (timbal, tembaga, merkuri, kadmium, krom) terhadap organisme perairan dan kesehatan manusia," *J. Akuatek*, vol. 1, no. 1, pp. 59–65, 2020.
- R. M. Rompas, *Toksikologi Kelautan*, 1st ed. Jakarta: Sekretariat Dewan Kelautan Indonesia, 2010.
- A. Taftazani, "Distribusi Konsentrasi Logam Berat Hg Dan Cr pada Sampel Lingkungan Perairan Surabaya," in *Prosiding PPI - PDIPN 2007 Pustek Akselerator dan Proses Bahan - BATAN*, 2007, pp. 36–45.
- E. Rochyatun, M. T. Kaisupy, and A. Rozak, "Distribusi logam berat dalam air dan sedimen di perairan muara Sungai Cisdane," *MAKARA Sci. Ser.*, vol. 10, no. 1, pp. 35–40, 2010, doi: 10.7454/mss.v10i1.151.
- Dwidjoseputro, *Dasar-Dasar Mikrobiologi*, 1st ed. Jakarta: Penerbit Djambatan, 1998.
- G. Satchanska, E. N. Pentcheva, R. Atanasova, V. Groudeva, R. Trifonova, and E. Golovinsky, "Microbial diversity in heavy-metal polluted waters," *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, vol. 19, no. 3, pp. 61–67, 2005, doi: 10.1080/13102818.2005.10817228.
- M. Tyagi, M. M. R. da Fonseca, and C. C. C. R. de Carvalho, "Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes," *Biodegradation*, vol. 22, no. 2, pp. 231–241, 2011, doi: 10.1007/s10532-010-9394-4.
- I. C. Ossai, A. Ahmed, A. Hassan, and F. S. Hamid, "Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 17, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2019.100526.
- V. M. Kensa, "Bioremediation - An overview," *J. Ind. Pollut. Control*, vol. 27, no. 2, pp. 161–168, 2011.
- Z. Yasmin and R. Wulansarie, "Review perbandingan pencemaran minyak di perairan dengan proses bioremediasi menggunakan metode biostimulus dan bioaugmentasi," *J. Reka Buana*, vol. 3, no. 1, 2017.
- R. Ahmad, "Mycoremediation to remove heavy metal pollution in post-mining areas for farmland utilization," *Indones. Bull. Anim. Vet. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 41–50, 2018.
- G. Adams, P. Fufeyin, S. Okoro, and I. Ehinomen, "Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: A review," *Int. J. Environ. Bioremediation Biodegrad.*, vol. 3, no. 1, pp. 28–39, 2020, doi: 10.12691/ijebb-3-1-5.
- I. P. Thompson, C. J. Van Der Gast, L. Ciric, and A. C. Singer, "Bioaugmentation for bioremediation: The challenge of strain selection," *Environ. Microbiol.*, vol. 7, no. 7, pp. 909–915, 2005, doi: 10.1111/j.1462-2920.2005.00804.x.
- T. Barkay, S. M. Miller, and A. O. Summers, "Bacterial mercury resistance from atoms to ecosystems," *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 27, no. 2–3, pp. 355–384, 2003, doi: 10.1016/S0168-6445(03)00046-9.
- W. D. Uno and S. R. Thalib, "penyerapan logam berat merkuri (Hg) oleh bakteri bacillus subtilis pada sedimen Danau Limboto," *Jambura Edu Biosf. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 8–12, 2020.
- W. Winnarsih, E. Emiyarti, and L. O. A. Afu, "Distribusi total suspended solid permukaan di perairan Teluk Kendari," *J. Sapa Laut*, vol. 1, no. 2, pp. 54–59, 2016, doi: 10.33772/jsl.v1i2.930.
- Mustaruddin, Nasruddin, Sadarun, F. Kurniawan, and M. S. Baskoro, "Characteristic of territorial water in its bearing with development of big pelagic fishing in Aceh Jaya Regency," *Bul. PSP*, vol. 19, no. 1, pp. 69–80, 2011.
- S. Wahidah *et al.*, "Analysis of Mercury and Its Distribution Patterns in Water and Sediment Samples from Krueng Sabee, Panga and Teunom Rivers in Aceh Jaya," *IOP Conference Series: Earth and*

- Environmental Science*, vol. 364, no. 1. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/364/1/012016.
- [33] S. Sugiarti, S. P. Sakti, and U. P. Juswono, "Pemanfaatan pseudomonas putida dan pseudomonas fluorescens sebagai biosensor untuk mengukur kadar BOD 5 dalam air," *Natural*, vol. 2, no. 2, pp. 134–139, 2013.
- [34] S. Wulandari and E. Suarsini, "Efektivitas Konsorsia Bakteri Indigen Dalam Mereduksi Logam Berat Merkuri (Hg) Limbah Cair Tepung Agar," in *Seminar Nasional Pendidikan dan Sainstek*, 2016, vol. 2016, no. 2011, pp. 441–446.
- [35] H. Canstein, S. Kelly, Y. Li, and I. Wagner-Dobler, "Species diversity improves the efficiency of mercury-reducing biofilms under changing environmental conditions," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 68, no. 6, pp. 2829–2837, 2002, doi: 10.1128/AEM.68.6.2829-2837.2002.
- [36] L. Cabral, R. Q. Yu, S. Crane, P. Giovanella, T. Barkay, and F. A. O. Camargo, "Methylmercury degradation by *Pseudomonas putida* V1," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 130, pp. 37–42, 2016, doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.03.036.
- [37] Q. Chen, Y. Li, M. Liu, B. Zhu, J. Mu, and Z. Chen, "Removal of Pb and Hg from marine intertidal sediment by using rhamnolipid biosurfactant produced by a *Pseudomonas aeruginosa* strain," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 22, p. 101456, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101456.
- [38] J. G. Holt, N. R. Krieg, P. H. A. Sneath, J. T. Stanley, and S. T. William, *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 1st ed. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994.
- [39] R. Hambali and Y. Apriyanti, "Studi karakteristik sedimen dan laju sedimentasi Sungai Daeng," *J. Tropil*, vol. 4, no. 2, pp. 165–174, 2017.
- [40] A. Daulat, M. Astrid Kusumaningtyas, R. Anggoro Adi, and W. Setiyo Pranowo, "Sebaran kandungan CO2 terlarut di perairan pesisir selatan Kepulauan Natuna," *Depik*, vol. 3, no. 2, pp. 166–177, 2014, doi: 10.13170/depik.3.2.1538.
- [41] M. S. Silitonga and S. Nedi, "Ratio of elements Carbon (C), Nitrogen (N), and Phosphorus (P) at sediment in Seagrass Ecosystem Nirwana Beach Padang West Sumatera," vol. 2, no. 3, pp. 170–176, 2021.
- [42] E. Indrayani, K. H. Nitimulyo, S. Hadisusanto, and R. Rustadi, "Analisis kandungan nitrogen, fosfor dan karbon organik di Danau Sentani - Papua," *J. Mns. dan Lingkung.*, vol. 22, no. 2, pp. 217–225, 2015.
- [43] P. Wulan, M. Gozan, B. Arby, and B. Achmad, "Penentuan rasio optimum C:N:P sebagai nutrisi pada proses biodegradasi benzena-toluena dan scale up kolom bioregenerator," *J. Univ. Indones.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [44] Masganti, Nurhayati, and N. Yuliani, "Peningkatan produktivitas padi di lahan pasang surut dengan pupuk P dan kompos jerami padi," *Indones. Soil Clim. J.*, vol. 41, no. 1, pp. 17–24, 2017, doi: 10.2017/jti.v41i1.6058.