

TEKNIK BIOREMEDIASI SEBAGAI SOLUSI DALAM UPAYA PENGENDALIAN PENCEMARAN LINGKUNGAN : *LITERATUR REVIEW*

Endah Rita Sulistya Dewi

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Atip Nurwahyunani*

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Coressponding E-mail: atipnurwahyunan@upgris.ac.id

Erma Lintang Sari

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Farisa Khoirun Nissa

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Merlly AlfinaSeptiana

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Diska R.P. Andriani

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Vionika Azuhro

Pendidikan Biologi, FMIPATI, Universitas PGRI Semarang

Abstract

Pollution is the entry or introduction of living organisms, energy substances, and/or other components into the environment. The increasing pollution of air and water, as well as the contamination of the soil, contributes to environmental degradation. Inadequate waste management that leads to environmental damage prompts the exploration of solutions, and one option is to employ bioremediation techniques for polluted air, water, and contaminated soil. This research involves a literature review of articles on bioremediation, aiming to outline bioremediation techniques as an alternative solution to environmental pollution. The investigation process includes 16 articles, which are then analyzed. The literature review results indicate that bioremediation techniques, such as phytoremediation, bioaugmentation, and biostimulation, are widely employed as environmental solutions. The findings from the literature review are expected to contribute recommendations for the application of bioremediation in addressing environmental pollution caused by waste.

Keywords: *Bioremediation, environmental pollution*

Abstrak

Pencemaran adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan. Meningkatnya jumlah air dan udara yang tercemar serta tanah yang terkontaminasi merupakan faktor dari rusaknya lingkungan. Pengelolaan limbah yang kurang menimbulkan dampak rusaknya lingkungan, salah satu pilihan mengatasi masalah tersebut dengan melakukan teknik bioremediasiterhadap air dan udara yang sudah tercemar serta tanah yang sudah terkontaminasi. Penelitian ini dilakukan dengan literatur review terhadap artikel mengenai bioremediasi yang bertujuan menguraikan teknik

bioremediasi sebagai alternatif solusi untuk pencemaran lingkungan. Proses investigasi melibatkan 16 artikel, kemudian dianalisis. Hasil tinjauan literatur menunjukkan bahwa teknik bioremediasi banyak digunakan sebagai solusi lingkungan diantaranya dengan metode fitoremediasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi. Hasil kajian literatur diharapkan dapat memberikan kontribusi rekomendasi penerapan bioremediasi dalam menangani limbah penyebab pencemaran lingkungan.

Kata Kunci : Bioremediasi, pencemaran lingkungan

PENDAHULUAN

Manusia saat ini kurang akan kesadaran lingkungan sendiri. Banyak yang masih kurang mengerti akan kebersihan lingkungan, sehingga dengan mudahnya membuat limbah yang sangat berbahaya bagi lingkungan. Manusia setiap hari selalu menghasilkan limbah karena manusia pelaku konsumsi dari kegiatan yang dilakukan setiap waktu atau setiap hari sehingga menghasilkan limbah (Sunarsi, 2014). Aktifitas manusia di lingkungan masyarakat sangat berpengaruh besarnya volume limbah dan meningkatnya limbah yang dihasilkan dari tahun ke tahun.

Peraturan tentang lingkungan mengatur tentang pengelolaan lingkungan serta menjaga lingkungan atas adanya pemanasan global atau perubahan iklim. Pengelolaan lingkungan khususnya mengenai limbah diperlukan adanya aturan yang jelas dan tegas terhadap terjadinya pelanggaran. Menurut Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, pencemaran adalah masuk atau dimasukkannya makhluk terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan penegakan hukum. Meskipun Undang-Undang tentang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup memberikan sanksi pidana terhadap pelanggaran lingkungan hidup tetapi masih dimungkinkan adanya penyelesaian lingkungan hidup diluar dari pengadilan serta masih berlakunya sanksi administratif.

Kontaminasi bahan pencemar yang berasal dari aktivitas industri, pertanian, peternakan, maupun kegiatan rumah tangga telah menyebabkan terjadinya penurunan kualitas air dan tanah yang signifikan. Terkontaminasinya air dan tanah oleh bahan pencemar dapat diatasi dengan teknik bioremediasi. Teknik bioremediasi merupakan penggunaan mikroorganisme yang telah dipilih untuk ditumbuhkan pada polutan tertentu sebagai upaya untuk menurunkan kadar polutan tersebut. Pada saat proses bioremediasi berlangsung, enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi struktur polutan beracun menjadi tidak kompleks sehingga menjadi metabolit yang tidak beracun dan berbahaya. Sehubungan dengan bioremediasi, Pemerintah Indonesia telah mempunyai payung hukum yang mengatur standar baku kegiatan Bioremediasi dalam mengatasi permasalahan lingkungan akibat kegiatan pertambangan dan perminyakan serta bentuk pencemaran lainnya (logam berat dan pestisida) melalui Kementerian Lingkungan Hidup, Kep Men LH No.128 tahun 2003, tentang tatacara dan persyaratan teknis dan pengelolaan limbah minyak bumi dan tanah terkontaminasi oleh minyak bumi secara biologis (Bioremediasi) yang juga mencantumkan bahwa bioremediasi dilakukan dengan menggunakan mikroba lokal. Beberapa metode yang digunakan dalam bioremediasi adalah fitoremediasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi. Oleh sebab itu, karya tulis ini bertujuan untuk memberikan solusi dalam upaya pengendalian

pencemaran lingkungan melalui teknik bioremediasi menggunakan metode fitoremediasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi.

Fitoremediasi adalah teknologi alternatif atau pelengkap yang dapat digunakan sebagai pengganti atau dikombinasikan dengan teknologi pembersihan mekanis konvensional, yang seringkali memerlukan banyak kerja dan modal serta energi (Pandey et al., 2016). Mekanisme dan efektivitas fitoremediasi bergantung pada jenis kontaminan, jumlah hayati yang tersedia, dan karakteristik tanah (Li et al., 2012). Tanaman dapat membersihkan atau memulihkan area yang tercemar. Kontaminan diserap pada tanaman terutama melalui sistem akar, yang berfungsi sebagai mekanisme utama untuk mencegah toksisitas. Sistem akar memberikan luas permukaan yang besar, yang memungkinkan kontaminan untuk menyerap dan mengakumulasi air serta nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan (Ma et al., 2011).

Salah satu metode untuk mempercepat proses biodegradasi adalah bioaugmentasi, di mana mikroorganisme ditambahkan ke media atau lingkungan tercemar (Andrezza et al. 2010). Bioaugmentasi adalah opsi penyisihan kontaminan yang murah, mudah, dan ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan kimia yang dapat mencemari lingkungan. Bakteri adalah salah satu mikroorganisme yang dapat digunakan untuk mengubah logam berat merkuri menjadi lebih baik. Bakteri adalah sel prokariotik, uniseluler, yang bereproduksi melalui pembelahan diri dan memiliki berbagai habitat. Bakteri melakukan degradasi, yaitu mengurangi, memecahkan, dan menyederhanakan rangkaian kompleks. Menghilangkan pencemar logam berat merkuri di dalam sedimen sungai, teknik bioaugmentasi melibatkan penambahan mikroorganisme bakteri (Kulshreshtha et al. 2014).

Biostimulasi yaitu pertumbuhan mikroba pendegradasi minyak asli tanah yang akan di stimulasi dengan penambahan nutrisi. Penambahan nutrisi pada bioremediasi tumpahan minyak mentah dapat membantu pertumbuhan mikroba di tanah. Penambahan nutrisi pada bioremediasi ini dapat menyebabkan penurunan konsentrasi minyak dalam waktu tertentu (Munawar et al., 2005). Ini karena pertumbuhan mikroba alami pada tanah tercemar akan menghancurkan TPH tanah yang tercemar minyak bumi. Meskipun mikroorganisme membutuhkan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor untuk hidup dan metabolisme, jumlah nutrisi biasanya rendah dalam tanah yang tercemar minyak bumi terbatas menghambat proses degradasi minyak tanah. Oleh karena itu, diperlukan tambahan nutrisi (Nugroho, 2006).

METODE PENELITIAN

Metode penelitian menggunakan studi literatur dengan mengadopsi beberapa artikel lalu meninjau dokumen dan mengevaluasi penelitian serupa sebelumnya tentang teknik bioremediasi. Tahapan metode literatur review berisi ; 1) Penyaringan naskah. Artikel yang dianalisis diperoleh dengan mencari literatur yang relevan secara online menggunakan beberapa database penelitian online terkenal yang terkait dengan teknik bioremediasi dan pencemaran air. Artikel yang digunakan dari tahun 2013 hingga tahun 2023. Artikel harus fokus pada bioremediasi limbah pencemaran air. Setelah mencari literatur di Google Scholar dan Publish or Perish maka didapat sekitar 14 artikel dan 1 buku yang relevan. Dengan meninjau judul dan abstrak, artikel dan buku yang dipilih diperiksa oleh peneliti untuk menentukan apakah artikel tersebut sesuai dengan tujuan penelitian. 2) Analisis ; dianalisis menggunakan konten kualitatif dengan korelasi antara konten dan konteks (Fillah, 2023).

Dalam hal ini peneliti menetapkan untuk meneliti tentang apakah teknik bioremediasi bisa dijadikan solusi dalam menghadapi permasalahan pencemaran lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini didasarkan pada artikel yang mengkaji kegiatan penelitian tentang teknik bioremediasi pencemaran lingkungan dengan metode fitoremediasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi sebagai solusi dalam upaya pengendalian kerusakan lingkungan pada periode 2013 – 2023.

Tabel 1. Detail Artikel Terpilih

Tema 1. Fitoremediasi		
Penulis	Judul	Jurnal
Irma, R., Endah, R. S. D., Maria, U.	Efektivitas Semanggi Air (<i>Marsilea Crenata</i>) Terhadap Kadar Cod pada Fitoremediasi Limbah Cair Tahun.	Prosiding Seminar Nasional Mahasiswa Universitas Islam Sultan Agung Semarang, April 2019.
Hanasari, F. P., Devany, E. F., Aulia, W. F., Jian, T., Andien, N. P., Farida, Z., Endah, R. S., Atip, N.	Efektivitas Semanggi Air (<i>Marsilea Crenata</i>) Terhadap Kadar TSS Pada Fitoremediasi Limbah Cair.	Jurnal Salome : Multidisipliner Keilmuan Vol. 1 No. 4 September 2023, hal. 227-236.
Alfina, D., Nurce, K., Septiana, N. K., Salma, N., Immas, S. R., Endah, R. S., Atip, N.	Efektivitas Tanaman <i>Salvinia Molesta</i> Sebagai Agen Fitoremediasi.	Jurnal Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Volume 1 Nomor 3 bulan Juli – September Page 74 – 78.
Maharani, S. P., Elsa, S. R., Septiana, K., Wima, R. P., Merlly, A. S., Endah, R. S., Atip, N.	Pemanfaatan Tumbuhan <i>Typha Latifolia</i> Sebagai Agen Fitoremediasi Dalam Pengolahan Limbah Cair.	Jurnal Salome: Multidisipliner Keilmuan Vol. 1 No. 4 September 2023, hal. 218-226.
Shela, N. W., Tria, A., Winny, R. M.	Studi Fitoremediasi Serapan Besi (Fe) dari Kolam Bekas Tambang Bauksit Menggunakan Purun (<i>Eleocharis sp.</i>)	LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Indonesia 2020 27(2): 67–78.
Wage, K., Yudhi, S. G.	Peran Rumput Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>) dalam Fitoremediasi Pencemaran Perairan Sungai.	Pusat Teknologi Lingkungan – BPPT.
Tuti, Suryati.	Fitoremediasi Cemar Hidrokarbon Minyak Bumi Menggunakan Potensi Tumbuhan <i>Typha Angustifolia</i> .	Jurnal Vol. 13 No. 1 Juni 2020 Hal. 18 – 34.
Tema 2. Bioaugmentasi		
Penulis	Judul	Jurnal

Syarifah, R. F., Cut, M., Rahayu, A. F., Rahmad, D., Yeni, A., Fikrinda.	Bioaugmentasi Air Tercemar Limbah Merkuri di Krueng Sabee Aceh Jaya Menggunakan Isolat <i>Bacillus DA11</i> .	Fakultas Pertanian Universitas Asahan, ISSN 0216-7689.
Achmad, D. G., Ipung, F.P.	Kajian Bioaugmentasi pada Air Tanah Tercemar Solar di Kecamatan Gedongtengen, Kota Yogyakarta.	JURNAL TEKNIK ITS Vol. 11, No. 3, (2022).
Radjali, A., F, Madubun.,D, Rahyuni.	Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Hidrokarbon Menggunakan Teknik Bioaugmentasi.	EnviroScienceteae Vol. 16 No. 2, Agustus 2020.
Kevin, Y. P., Herwin, L., Agus, B. L.	Efektivitas Bioaugmentasi dengan <i>Pseudomonas aeruginosa</i> pada Tanah Tercemar Minyak Bumi.	Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-III "Tantangan Pengelolaan Limbah Domestik dan Industri untuk Pembangunan Berkelanjutan" Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, 21 Agustus 2021.
Dewi, R. R., Sarwoko, M.	Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya).	JURNAL TEKNIK ITS Vol. 11, No. 1, (2022).

Tema 3. Biostimulasi

Penulis	Judul	Jurnal
Kautsar, D. S., Naniek, R.	Bioremediasi Tanah Tercemar Hidrokarbon Dengan Metode Biostimulasi di Woncolo, Bojonegoro.	Volume 2, Nomor 1 (2021).
Sandi, F. P., Dezi, H.	Pengaruh Isolat <i>Pseudomonas sp.</i> dan <i>Bacillus sp.</i> dengan Biostimulasi Kompos Jerami Padi (<i>Oryza Sativa L.</i>) Terhadap Penurunan Total Petroleum Hidrokarbon Tanah Tercemar Oli Bekas.	Berkala Ilmiah Bidang Biologi, ISSN : 2354 – 8371.

Wagiono., Atmono., Diah, Ayu W.	Pengaruh Variasi Waktu Terhadap Penurunan Total <i>Petroleum Hydrocarbon</i> (TPH) Pada Proses Bioremediasi Limbah Oli dengan Metode Biostimulasi.	Jurnal Lingkungan dan Sumberdaya Alam (JURNALIS) ISSN 2828-5638 Volume 5 Nomor 2, Oktober 2022: 109-120.
Karin, A. R., Lailatus, F., Nynda, A. F., Nur, F. A., Ayu, D. W., Aisyah, H. R.	<i>Quick Solution</i> Bencana Tumpahan Minyak Mentah Melalui Aplikasi <i>Ecoenzim</i> Produk Fermentasi Sampah Kulit Nanas Sebagai Katalis Remediasi Pada Metode Biostimulasi.	Best Jurnal Vol.6 No.1 Hal. 669-675 ISSN : 2614 – 8064 Juli 2023

Tema 1. Metode Fitoremediasi

Penelitian dalam buku Rohmawati et al. (2020) menunjukkan bahwa Semanggi Air efektif dalam menurunkan kadar COD limbah cair tahu. Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan kadar COD yang bervariasi dengan nilai COD 2018,67; 782; 444; dan 125,3. Perlakuan yang paling efektif adalah P3 dengan biomassa 75 gram menghasilkan penurunan COD mencapai 94% dan telah memenuhi baku mutu Permen LH No.15 tahun 2008 dengan batas maksimal COD 150 mg/L. Dalam konteks pengendalian pencemaran, fitoremediasi dengan menggunakan Semanggi Air dapat menjadi solusi yang ramah lingkungan. Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa fitoremediasi menggunakan Tanaman Semanggi air efektif terhadap penurunan kadar COD pada fitoremediasi limbah cair tahu yang dibuktikan dengan penurunan kadar COD 0%, 61%, 78% dan 94% dengan nilai COD 2018,67;782;444; dan 125,3. Sehingga dapat membantu mengurangi dampak negatif pencemaran lingkungan, serta semakin tinggi biomassa semanggi air, keefektifan dalam menurunkan kadar BOD akan meningkat.

Penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo et al. (2022) dalam review Pranama et al. (2023) fokus pada penggunaan kombinasi tanaman *Salvinia molesta*, *Marsilea crenata*, dan *Azolla pinnata* sebagai agen fitoremediasi untuk mengatasi insektisida Diazinon dalam limbah cair. Temuan utama dari penelitian ini menyatakan bahwa fitoremediasi yang diterapkan mampu mengurangi kandungan bahan organik dalam limbah cair. Hasil data menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan konsentrasi larutan insektisida Diazinon, ketiga jenis tanaman mengalami layu dengan lebih cepat, meskipun tanaman tersebut belum sampai mati. Selain itu, perlakuan dengan konsentrasi 2 ml menunjukkan penurunan nilai Total Dissolved Solids (TDS), mengindikasikan bahwa semakin tinggi konsentrasi pestisida, semakin tinggi pula nilai TDS akibat berkurangnya senyawa organik. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam memahami potensi tanaman- tanaman tersebut sebagai agen fitoremediasi dalam mengatasi dampak insektisida Diazinon pada limbah cair.

Berdasarkan studi sebelumnya Chan Derek Juinn Chiesh (2017) dalam review Damayanti et al. (2023), terdapat beberapa jenis tumbuhan akuatik yang memiliki potensi sebagai agen fitoremediasi. Beberapa di antaranya adalah *Salvinia molesta*, *Pistia stratiotes*, *Azolla pinnata*, *Hydrilla verticillata*, *Pteris vittata*, *Rumex acetosa*, dan *Sebertia acuminata*. Tumbuhan-tumbuhan ini diyakini mampu berperan efektif dalam membersihkan air limbah dan mengurangi kontaminan seperti logam berat dan nutrisi, serta meningkatkan kualitas air secara keseluruhan. Penelitian ini

dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi tingkat pengurangan jumlah padatan tersuspensi dan ammoniakal nitrogen dalam air limbah kumbahan melalui penerapan metode fitoremediasi.

Berdasarkan review yang dilakukan oleh Putri et al. (2023) dijelaskan bahwa salah satu pemanfaatan tanaman *Typha latifolia*, yaitu digunakan sebagai agen fitoremediasi dalam pengolahan limbah cair. Metode fitoremediasi yaitu memanfaatkan tumbuhan air jenis *Typha latifolia* sebagai media untuk menyerap kadar amonia di dalam limbah. Pengaruh tinggi tanaman terlihat bahwa semakin tinggi tanaman penurunan konsentrasi amonia semakin lebih cepat. Hal ini disebabkan karena tinggi tanaman terkait dengan umur tanaman. Semakin lama umur tanaman, semakin banyak dan panjang akar tanaman yang tumbuh. Semakin banyak akar tanaman semakin banyak juga amonia yang mampu diserapnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Wulan et al. (2020) mengenai tanaman purun sebagai fitoremediasi serapan Fe menghasilkan bahwa proses oksidatif Fe pada akar purun, mengirimkan oksigen ke akar sehingga Fe^{2+} terlarut di tanah menjadi Fe^{3+} yang dapat mengendap di akar. Purun mengandung senyawa kelat di akar dan batang, sehingga mampu menoleransi konsentrasi Fe berlebih yang masuk ke dalam jaringan. Selain itu, aktivitas fotosintesis oleh akar purun yang menghasilkan oksigen akan meningkatkan oksigen terlarut bagi mikroorganisme di sekitar akar, sehingga bahan pencemar dapat diuraikan menjadi unsur hara yang diserap oleh tumbuhan. Logam yang dapat larut masuk ke membran sel, lalu diangkut melalui jaringan pengangkut xilem dan floem. Molekul kelat yang terdapat dalam jaringan pengangkut berfungsi untuk meningkatkan dan mengefisienkan penyerapan logam. Muatan ion pada logam ditranslokasikan ke bagian lain dan logam dilokalisasi pada sel tertentu (Irharni et al., 2017). Dalam hal ini, besi yang diangkut jaringan pengangkut ditransportasikan ke jaringan daun.

Berdasarkan penelitian Komarawidjaja dan Yudhi (2015) Rumput Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) sangat baik untuk diterapkan dalam aplikasi teknologi fitoremediasi di kawasan bantaran sungai, karena selain untuk mengurangi konsentrasi nutrien dari pencemaran air sungai, mekanisme menambah panjang akar yang ditunjukkan oleh vetiver berarti kemampuan vetiver dalam mengurangi resiko tanah longsor dan erosi pada lahan bantaran sungai sangat baik. Hasil analisis jaringan akar menunjukkan bahwa jumlah nitrogen yang diserap oleh vetiver di dalam kolam/bak air tanah pada mulanya adalah sebesar 75,03 mg dan menjadi 51,04 mg setelah 63 hari masa tanam. Sedangkan analisis jaringan akar pada vetiver yang ditanam pada air tanah pada hari ke-0 adalah 75,03 mg (0,78% dari berat kering 9,62 gram) dan menjadi 143,25 mg (0,79% dari berat kering 18,13 gram) pada hari ke-63.

Penelitian yang dilakukan oleh Pavanelli (2019) dalam Suryati (2020), tanaman *Typha latifolia* mampu mendegradasi TPH sebesar 74% pada tanah yang ditanami, sedangkan pada tanah yang tidak ditanami hanya 35% selama 120 hari masa tanam. Tanaman *Ludwigia octovalvis* yang ditanam dalam media yang berisi pasir dan lumpur minyak mentah (10%, 50%, dan 100% (v / v)), degradasi lumpur minyak mentah (dinyatakan dengan kadar TPH) lebih tinggi pada media yang ditanami daripada media yang tidak ditanami (kontrol) selama paparan 42 hari (Alanbary et al. 2019). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan tanaman mampu menurunkan kandungan cemaran minyak, termasuk tanaman *Typha angustifolia*, sehingga tanaman ini potensial untuk digunakan dalam fitoremediasi cemaran hidrokarbon minyak bumi.

Tema 2. Metode Bioaugmentasi

Menurut penelitian yang dilakukan (Renny Fauzi et al., 2017) Hasil uji F dari hasil analisis merkuri setelah dilakukan bioaugmentasi menggunakan *Bacillus* DA11 terhadap air sungai, pada lampiran 3 dan 4 menunjukkan bahwa *Bacillus* DA11 berpengaruh sangat nyata terhadap kadar merkuri air sungai. menunjukkan bahwa rata – rata kadar merkuri setelah di bioaugmentasi, terendah dimiliki oleh tanpa pemberian *Bacillus* yang berbeda nyata terhadap populasi bakteri 10% dan 20%. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Kotala et al., (2014), bahwa bakteri yang ditemukan di Sedimen pabrik pengolahan emas di Desa Waekerta Kabupaten Buru, Provinsi Maluku adalah *Bacillus* sp dan *Aeromonas hydrophila*, *Bacillus* sp mampu mengurangi HgCl₂ sebesar 98,7% dan *Aeromonas hydrophila* mampu mengurangi HgCl₂ sebesar 98,33%.

Penelitian (Pengelolaan et al., 2021) pemilihan bakteri yang digunakan dalam bioaugmentasi air tanah tercemar ini merupakan isolat bakteri konsorsium yang terdiri dari spesies bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*. Bakteri tersebut dipilih karena memiliki persentase efisiensi degradasi polutan solar yang cukup tinggi sehingga efektif untuk digunakan dalam proses bioaugmentasi. Polutan solar terdiri dari beberapa jenis senyawa hidrokarbon seperti alifatik, aromatik, dan olefin. Oleh karena itu, dipilih mixed culture karena penggunaan spesies bakteri yang berbeda memiliki kemampuan degradasi pada komponen senyawa dalam solar yang berbeda. Maka, efisiensi degradasi solar akan menjadi lebih tinggi. Langkah awal yang harus dilakukan adalah melakukan pemantauan awal pada lokasi yang tercemar untuk mengetahui kondisi awal dari area tersebut. Selanjutnya adalah pemilihan teknologi yang terdiri dari monitored natural attenuation (proses degradasi secara alami), biostimulasi (penambahan nutrisi), dan bioaugmentasi (penambahan bakteri). Bioaugmentasi dilakukan dengan melakukan seleksi kultur bakteri dan tes laboratorium terlebih dahulu. Setelah itu dilakukan produksi dan inokulasi kultur bakteri sesuai dengan jumlah yang dibutuhkan. Setelah bakteri siap, maka kultur bakteri akan diinjeksikan pada area yang tercemar. Kemudian setelah dilakukan injeksi, harus dilakukan pengamatan secara berkala untuk memantau kinerja dari kultur bakteri yang telah ditambahkan dalam mendegradasi polutan yang ada pada area tercemar.

Kavitha Ramadass et al. (2018) menyampaikan empat unsur utama yang dibutuhkan untuk menunjang proses bioremediasi yaitu C, N, P, dan K. Proses bioremediasi dengan memanfaatkan bakteri membutuhkan pH media yang netral atau 7,0 dan ini lebih rendah daripada pH tanah terkontaminasi, 7,4. Pada lahan-lahan terkontaminasi hidrokarbon bakteri *B. cereus* dapat dengan mudah ditemukan secara in-situ atau bakteri indigen dan mampu memanfaatkan hidrokarbon di dalam tanah sebagai sumber carbon dan energi. Penelitian ini menggunakan tanah terkontaminasi yang diambil dari bengkel otomatis kecil dan menunjukkan bahwa walaupun tanah terkontaminasi itu tidak dikelola, TPH-nya akan berkurang secara alami karena di dalamnya terdapat bakteri indigen yang mampu menguraikan hidrokarbon menjadi senyawa atau unsur yang lebih ramah lingkungan.

Bioaugmentasi adalah penambahan biakan mikroba pra-tumbuh untuk meningkatkan populasi mikroba di lokasi, guna meningkatkan remediasi polutan. Mikroba asli (indigenous) biasanya hadir dalam jumlah yang sangat kecil dan mungkin tidak dapat mencegah penyebaran kontaminan. Pengujian TPH dilakukan menggunakan metode SNI 6989.10-2011. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tanah tanpa pengolahan (sampel Ø) menunjukkan kadar TPH sebanyak 16,47%, yang artinya selama 75 hari tanah tersebut memiliki kadar TPH konstan yaitu 16,47%. Tanah dengan penambahan 0,042 mL inokulum bakteri cair per gram tanah (Sampel A) memiliki

kadar TPH 8,94% dan tanah dengan penambahan 0,126 mL inokulum bakteri cair per gram tanah (Sampel B) memiliki kadar TPH 8,45%. Berdasarkan data tersebut, sampel A memiliki tingkat keefektifan 45,72% dan sampel B memiliki tingkat keefektifan 48,69%. Proses penurunan kadar TPH terjadi karena rantai karbon dalam pencemaran akan disederhanakan oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa* sehingga akan lebih mudah terurai. Reaksi yang dapat terjadi yaitu monooksigenase dan dioksidase (Pengelolaan et al., 2021).

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 (Rahayu dan Sarwoko, 2022). 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 $2,475 \text{ m}^3 \times 10^{12} \text{ sel/ml}$. 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.

Tema 3. Metode Biostimulasi

Menurut penelitian Sandi, Dezi (2017) Semakin besar pemberian konsentrasi nutrisi khususnya kadar hara N, P, K pada tanah tercemar minyak bumi akan menambah konsentrasi kadar hara pada tanah, sehingga kadar hara pada tanam menjadi tercukupi. Meningkatnya kadar hara tersebut menstimulasi pertumbuhan dan perkembangbiakan bakteri pendegradasi hidrokarbon sebagai penurunan kadar TPH. Menurut penelitian Kautsar, Naniek (2021) Penurunan TPH disebabkan karena proses degradasi terhadap senyawa hidrokarbon oleh bakteri indigenous seperti *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Achromobacter*, *Corynebacterium* dan *Nocardia* yang telah distimulasi pertumbuhannya oleh penambahan nutrisi berupa pupuk organik kedalam tanah tercemar minyak bumi tersebut.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Pseudomonas sp.* dan formula konsorsium juga memiliki kemampuan yang baik dalam degradasi. Meskipun persentase degradasi lebih rendah dibandingkan dengan *Bacillus sp.* Kemampuan konsorsium mikroba dalam mendegradasi hidrokarbon ini sejalan dengan referensi. Faktor-faktor yang mempengaruhi adanya perbedaan hasil dari nilai TPH antara lain adalah nutrisi organik yang digunakan untuk menstimulasi bakteri dan faktor lingkungan terutama nutrisi, pH dan temperatur yang dapat mendukung kelangsungan proses degradasi senyawa hidrokarbon yang dilakukan oleh bakteri. Hal ini disebabkan dalam keadaan bersama diantara isolat terjadi kerjasama sinergisme untuk menghasilkan enzim yang dapat memecah struktur hidrokarbon. Hal ini juga disebabkan formula konsorsium menghasilkan enzim yang bervariasi. Adanya variasi tingkat penguraian dan jumlah enzim yang lebih banyak akan menyebabkan penguraian berlangsung dengan baik.

KESIMPULAN

Teknik bioremediasi sebagai solusi pencemaran lingkungan terbukti efektif dari beberapa literatur, diantaranya dengan menggunakan metode fitoremediasi, bioaugmentasi, dan biostimulasi. Berdasarkan hasil literatur review tersebut bioremediasi dapat dijadikan solusi untuk penanggulangan pencemaran lingkungan dengan berbagai metode yang dapat digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Alanbary, SRN., Abdullah, SRS., AlBaldawi, IAW., Hassan, HA., Anuar, N., Othman, AR., Suja, F. (2019). Phytotoxicity of Contaminated Sand Containing Crude Oil Sludge on *Ludwigia octovalvis*. *Journal of Ecological Engineering*, Volume 20, Issue 11, December 2019, pages 246– 255.
- Chan Derek Juinn Chiesh, N. Y. S. (2017a). *Wastewater phytoremediation by Salvinia Molesta*. Science Direct.
- Damayanti, A., et al. 2023. Efektivitas Tanaman *Salvinia Molesta* Sebagai Agen Fitoremediasi. *Jurnal Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam* Volume 1 Nomor 3 bulan Juli – September Page 74 – 78.
- Dewi, E.R.S. 2020. *BIOREMEDIASI Mikroorganisme sebagai Fungsi Bioremediasi Perairan Tercemar*. Perpustakaan Nasional : Katalog Dalam Terbitan (KDT).
- Fillah, A.H.A.et al. 2023. Tanaman Lotus (*Nelumbo nucifera*) sebagai Agen Fitoremediasi Limbah Pencemaran Air. *Jurnal Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam* 1 (3) : 64-73.
- Irhamni, Pandia S, Purba E, Hasan W. 2017. Kajian Akumulator Beberapa Tumbuhan Air dalam Menyerap Logam Berat Secara Fitoremediasi. *Jurnal Serambi Engineering* 1(2): 75–84.
- Kautsar, D. S., Naniek, R. 2021. Bioremediasi Tanah Tercemar Hidrokarbon Dengan Metode Biostimulasi di Woncolo, Bojonegoro. Volume 2, Nomor 1 (2021).
- Komarawidjaja, W., dan Yudhi, S.G. 2015. Peran Rumput Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) dalam Fitoremediasi Pencemaran Perairan Sungai. *Pusat Teknologi Lingkungan – BPPT*.
- Kotala, S., R. Kawuri dan I.B.W. Gunam. 2014. The Presence of Mercury Resistant Bacteria in Sediment of Gold Processing Plant at Waekerta Village of Buru District, Maluku Province and Their Activity in Reducing Mercury. *Current World Environment* 9(2): 271- 279.
- Li, H.-Y., Wei, D.-Q., Shen, M., & Zhou, Z.-P. (2012). Endophytes and their role in phytoremediation. *Fungal Diversity*, 54(1), 11–18.
- Ma, Y., Prasad, M. N. V., Rajkumar, M., & Freitas, H. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology Advances*, 29 (2), 248 – 258.
- Munawar dan Tini Surtiningsih. 2005. Bioremediasi Tumpahan Minyak Mentah Dengan Metode Biostimulasi Di Lingkungan Pantai Surabaya Timur. *Jurnal Hayati*.105-132.
- Nugroho, A. 2003. *Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Pandey, V. C., Bajpai, O., & Singh, N. (2016). Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 58–73.

- Pavanelli, AG. (2007), Phytoremediation of petroleum contaminated soil using *Typha latifolia*. http://www.uel.br/pos/quimica/arquivos/alex_pavanelli_abstract.pdf.
- Pengelolaan, T., Domestik, L., Industri, D., Berkelanjutan, P., Perwira, K. Y., Lukito, H., Irawan, A. B., Jurusan,), Lingkungan, T., Fakultas, /, Mineral, T., Veteran, U. ", & Yogyakarta, ". (2021). Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-III Efektivitas Bioaugmentasi dengan *Pseudomonas aeruginosa* pada Tanah Tercemar Minyak Bumi. In Fakultas Teknologi Mineral.
- Prasetyo, H. D., N, A. F., K, A. A., Nazirah, Y., & Viska, P. (2022). Pemanfaatan *Salvinia molesta*, *Marsilea crenata* dan *Azolla pinnata* Sebagai Agent Fitoremediasi Insektisida Diazinon. *Biotropical Research and Nature Technology*, 1(1), 7–13.
- Pranama, H. F., et al. 2023. Efektivitas Semanggi Air (*Marsilea Crenata*) Terhadap Kadar TSS Pada Fitoremediasi Limbah Cair. *Jurnal Salome : Multidisipliner Keilmuan* Vol. 1 No. 4 September 2023, hal. 227-236.
- Putri, M.S., et al. 2023. Pemanfaatan Tumbuhan *Typha Latifolia* Sebagai Agen Fitoremediasi Dalam Pengolahan Limbah Cair. *Jurnal Salome* 1(4) : 218-226, September 2023. Pengelolaan, T., Domestik, L., Industri, D., Berkelanjutan, P., Perwira, K. Y., Lukito, H., Irawan, A. B., Jurusan,), Lingkungan, T., Fakultas, /, Mineral, T., Veteran, U. ", & Yogyakarta, ". (2021). Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Ke-III Efektivitas Bioaugmentasi dengan *Pseudomonas aeruginosa* pada Tanah Tercemar Minyak Bumi. In Fakultas Teknologi Mineral.
- Rahayu, D.R., dan Sarwoko, M. 2022. Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya). *Jurnal Teknik ITS* Vol. 11, No. 1, (2022).
- Ramadass, K., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2018). Bioavailability of weathered hydrocarbons in engine oilcontaminated soil: Impact of bioaugmentation mediated by *Pseudomonas* spp. on bioremediation. *Science of the Total Environment*, 636, 968-974. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.379>
- Renny Fauzi, S., Meutia, C., Ansyia Fitri, R., Danil, R., & Arista, Y. (n.d.). Bioaugmentasi Air Tercemar Limbah Merkuri Di Krueng Sabee Aceh Jaya Menggunakan Isolat *Bacillus* Da11.
- Rohmawati, I., Endah, R.S.D., dan Maria, U. 2019. Efektivitas Semanggi Air (*Marsilea Crenata*) Terhadap Kadar Cod pada Fitoremediasi Limbah Cair Tahun. Prosiding Seminar Nasional Mahasiswa Universitas Islam Sultan Agung Semarang, April 2019.
- 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.
- Sandi, F. P., Dezi, H. 2017. Pengaruh Isolat *Pseudomonas* sp. dan *Bacillus* sp. dengan Biostimulasi Kompos Jerami Padi (*Oryza Sativa* L.) Terhadap Penurunan Total Petroleum Hidrokarbon Tanah Tercemar Oli Bekas. *Berkala Ilmiah Bidang Biologi*, ISSN : 2354 – 8371.
- Sunarsi, E. (2014). Konsep Pengolahan Limbah Rumah Tangga Dalam Upaya Concept of Household Waste in Environmental Pollution. *Ilmu Kesehatan Masyarakat*.
- Suryati, T. 2020. Fitoremediasi Cemar Hidrokarbon Minyak Bumi Menggunakan Potensi Tumbuhan *Typha Angustifolia*. *Jurnal* Vol. 13 No. 1 Juni 2020 Hal. 18 – 34.

Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009. Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Wulan, S.N., Tri, A., dan Winny, R.M. 2020. Studi Fitoremediasi Serapan Besi (Fe) dari Kolam Bekas Tambang Bauksit Menggunakan Purun (*Eleocharis* sp.). LIMNOTEK Perairan Darat Tropis di Indonesia 2020 27(2): 67–78.