



REVIEW : PERANAN BAKTERI PENDEGRADASI SENYAWA PENCEMAR LINGKUNGAN MELALUI PROSES BIOREMEDIASI

**Rida Oktorida Khastini^{1*}, Laila Rahma Zahranie², Risma Aulia Rozma³,
dan Yolanda Ade Saputri⁴**

^{1,2,3,&4}Jurusan Pendidikan Biologi, FKIP, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,
Indonesia

*E-Mail : rida.khastini@untirta.ac.id

DOI : <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v10i1.4836>

Submit: 07-02-2022; Revised: 09-02-2022; Accepted: 25-05-2022; Published: 30-06-2022

ABSTRAK: Adanya polutan berupa zat-zat berbahaya seperti hidrokarbon, merkuri, amonium, nitrogen, dan plastik yang sulit untuk terdegradasi dapat menyebabkan pencemaran sehingga menyebabkan keracunan bagi komponen biotik pada suatu ekosistem lingkungan. Oleh karena itu bioremediasi digunakan sebagai salah satu cara mengelola dan mengontrol polutan melalui pemanfaatan mikroorganisme yaitu bakteri. Artikel ini memberikan gambaran tentang informasi terbaru yang mengacu pada penggunaan bakteri sebagai agen bioremediasi, dan mekanisme penerapan teknologinya. Metode yang digunakan dalam kajian materi yaitu analisis data kualitatif dengan mengobservasi dan menarik suatu kesimpulan dalam jurnal untuk mengkaji peran bakteri sebagai agen bioremediasi polutan berbahaya. Berdasarkan kajian dapat diketahui adanya bakteri yang memiliki metabolisme khusus untuk medegradasi polutan anorganik dan organik seperti hidrokarbon (termasuk minyak bumi), minyak solar, merkuri, ammonia nitrogen, selulosa, amilum, lemak, styrofoam, kromium, dan logam berat. Kondisi lingkungan yang berlaku juga dapat membantu organisme yang terlibat untuk mempercepat laju proses bioremediasi berlangsung.

Kata Kunci: Bakteri, Bioremediasi, Polutan.

ABSTRACT: *Pollutants can cause pollution and poisoning of biotic components in a natural ecosystem in dangerous compounds such as hydrocarbons, mercury, ammonium nitrogen, and difficult-to-degrade plastics. Therefore, bioremediation is used to manage and control pollutants through bacteria. This article provides an overview of the latest information regarding bacteria as bioremediation agents and the technology's mechanisms. The method used is qualitative data breakdown by observing and drawing conclusions in the journal to examine the role of bacteria as bioremediation agents for harmful pollutants. Based on the study, bacteria have a unique metabolism to degrade inorganic and organic pollutants such as hydrocarbons (including petroleum), diesel oil, ammonia nitrogen, cellulose, starch, fat, styrofoam, chromium, and heavy metals. Furthermore, the overall environmental conditions can also help the organisms involved to accelerate the bioremediation process.*

Keywords: Bacteria, Bioremediation, Pollutant.



Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi is Licensed Under a [CC BY-SA Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumber daya alam dan memiliki banyak sektor industri maupun pertanian dan perkebunan. Sektor industri dan pertanian telah banyak menggunakan logam berat sebagai bahan





tambahan maupun sebagai katalis. Jika ditinjau dari sudut pandang industri, penggunaan logam berat ini sangat menguntungkan karena dapat mempercepat waktu produksi. Akan tetapi, penggunaan logam tersebut memiliki dampak negatif apabila mencemari lingkungan. Keberadaan logam berat akan mengganggu keseimbangan biota dan memberikan dampak negatif kepada manusia apabila manusia mengkonsumsi biota yang berada pada perairan tersebut. Logam berat menjadi polutan lingkungan dengan toksisitasnya yang tinggi, dan kemampuan untuk terakumulasi dalam tubuh manusia melalui bioakumulasi (Gworek *et al.*, 2020).

Penyebab pencemaran lingkungan lainnya dapat berupa senyawa anorganik maupun organik. Industri petrokimia penghasil senyawa organik hidrokarbon minyak bumi berkembang pesat karena diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi suatu negara. Akan tetapi penggunaan minyak bumi dapat mengakibatkan kerusakan lingkungan, misalnya jika terjadi kecelakaan ledakan selama eksplorasi ladang minyak, kebocoran dari pipa minyak dan kapal *tanker* minyak. Tumpahan besar harus didaur ulang atau dihilangkan semaksimal mungkin, tetapi dalam beberapa kasus akan sangat sulit untuk memulihkan lingkungan yang berdampak sehingga menimbulkan resiko yang terus-menerus terhadap lingkungan (Xu *et al.*, 2018).

Plastik dimanfaatkan untuk banyak aplikasi dan produk karena sifat termomekanik yang tinggi, ketahanan tinggi, stabilitas dan daya tahan, kelembaman kimia, kelenturan, permeabilitas air rendah, ringan, dan biaya rendah. Plastik yang merupakan produk turunan hidrokarbon seperti *polivinil klorida* (PVC), *polietilen* (PE), *polipropilen* (PP), *polistirena* (PS), dan *polietilen tereftalat* (PET) ternyata berkontribusi cukup besar juga sebagai penyebab permasalahan lingkungan (Lwanga *et al.*, 2018). Plastik dalam jumlah besar terakumulasi di berbagai lingkungan dan secara alami sulit untuk terdegradasi.

Polutan yang berasal dari senyawa organik juga dapat berpotensi untuk membahayakan lingkungan dan organisme yang hidup di dalamnya. Berbagai macam bahan kimia organik beracun telah diproduksi dan dikomersialkan secara industri untuk penggunaannya dalam kegiatan pertanian dan kehutanan yang berbahaya bagi manusia dan hewan. Polutan organik bertanggung jawab atas banyak efek kesehatan yang merugikan dan masalah lingkungan terestrial maupun akuatik di berbagai belahan dunia. Pada perairan tambak sebagai contohnya, banyak dihasilkan limbah organik dari sisa pakan maupun kotoran hewan. Limbah organik tersebut dapat meningkatkan kandungan amonia yang mematikan bagi biota di dalam air (Sambu, 2021).

Penanganan yang kurang baik pada sumber limbah tersebut dapat menimbulkan berbagai pencemaran. Oleh karena itu, diperlukan adanya teknik pengolahan limbah. Salah satu teknik yang banyak dimanfaatkan yaitu Bioremediasi. Bioremediasi merupakan teknik untuk mendegradasi atau mendetoksifikasi polutan organik dan anorganik menggunakan agen Biologi (Melati, 2020). Bioremediasi ini akan memanfaatkan mekanisme Biologi untuk mendegradasi zat cemar hingga tingkat yang tidak membahayakan dengan mekanisme kerja degradasi dan transformasi. Adapun teknik pada bioremediasi





sendiri terbagi menjadi dua, yaitu melalui pemulihan secara alami dan melalui peningkatan. Pemulihan secara alami dilakukan dengan mendegradasi polutan melalui aktivitas mikroorganisme *indigenous*, Keuntungan degradasi dengan teknik ini yaitu tidak menimbulkan kerusakan habitat dan tindakannya lebih banyak memperbaiki dibandingkan merusak.

Berbagai jenis bakteri yang berperan sebagai agen bioremediasi memiliki mekanisme yang khusus dalam mendegradasi polutan. Mekanisme yang dilakukan oleh degradator sesuai dengan proses metabolisme bakteri dan substrat polutan yang mencemari lingkungan. Pengetahuan tentang proses metabolisme dan kaitannya dengan mekanisme bioremediasi ini dapat dimanfaatkan dalam penelitian lanjutan sehingga pemanfaatan mikroorganisme ini dapat dilakukan dengan efektif, efisien, dan luas untuk membantu pemulihan lingkungan yang tercemar.

METODE

Artikel ini disusun berdasarkan hasil penelusuran data dan informasi Jurnal Nasional yang terindeks SINTA dan Jurnal Internasional bereputasi digunakan sebagai sumber data dan informasi dari tahun publikasi jurnal 2017-2021. Pencarian dilakukan dengan menggunakan kata kunci bahasa Indonesia dan bahasa Inggris pada *Google Scholar* dan database SCOPUS menggunakan “bioremediasi, biodegradasi, mikroorganisme, bakteri”. Jurnal yang diperoleh diseleksi berdasarkan judul dan abstrak. Strategi untuk analisis data dilakukan dengan deskriptif yaitu jurnal yang sudah terkumpul dan memenuhi kriteria secara inklusi diubah dalam bentuk tabel dan dalam bentuk narasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan bakteri menguntungkan sebagai agen bioremediasi dapat menjadi cara untuk mengatasi masalah polutan organik maupun anorganik yang terakumulasi di lingkungan dengan proses yang lebih ramah dan ekonomis dibandingkan proses fisika dan kimia. Mikroorganisme tersebar luas di *biosfer* dan melalui kemampuan metabolismenya yang dapat menggunakan bahan polutan sebagai sumber energinya pada berbagai kondisi lingkungan dapat dimanfaatkan dalam proses remediasi polutan. Berbagai substrat anorganik dan organik yang dimanfaatkan oleh bakteri sebagai agen bioremediasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis Polutan sebagai Substrat Pertumbuhan Bakteri Agen Bioremediasi.

No.	Substrat	Jenis Bakteri	Referensi
Senyawa Anorganik			
1	Hidrokarbon	<i>Bacillus</i> sp., <i>Azotobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Klebsiella</i> sp., <i>Citrobacter</i> sp., <i>Enterobacter</i>	Xu <i>et al.</i> , (2018); Adlan <i>et al.</i> , (2020);
	Hidrokarbon : Minyak solar	<i>Klebsiella</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Citrobacter</i> , dan <i>Enterobacter</i> <i>Vibrio alginolyticus</i>	Chen <i>et al.</i> , (2017)





2	Plastik: polistirena/styrofoam	<i>Bacillus</i> sp., <i>Mycrobacterium</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp.	Villaverde <i>et al.</i> , (2017)
3	Logam berat: merkuri	<i>Bacillus</i> sp., <i>Corynebacterium</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Vibrio</i> sp., <i>Serratia</i> sp., <i>Shigella</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp., <i>Pseudomonas maltophilia</i> , <i>Pseudomonas</i> sp. <i>Morganella morganii</i>	Lutfi (2018); d'Errico <i>et al.</i> , (2020)
4	Logam berat: kromium	<i>Bacillus</i> sp. dan <i>Azotobacter</i> sp.	Awaluddin dan Bieby (2020)
Senyawa Organik			
5	Ammonium nitrogen	<i>Bacillus</i> sp., <i>Agrobacterium vitis</i> , <i>Staphylococcus saprophyticus</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Bacillus</i> <i>megaterium</i> , dan <i>Micrococcus luteus</i>	Shabbir <i>et al.</i> , (2020)
6	Selulosa, protein, amilum dan lipid	<i>Cellulomonas</i> sp. <i>Rhodothermus</i> sp. <i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp.	Novitasari <i>et al.</i> , (2021)

Bakteri yang Dimanfaatkan sebagai Biodegradator Hidrokarbon

Hidrokarbon minyak bumi merupakan kontaminan lingkungan yang paling sering ditemui. Masuknya hidrokarbon minyak bumi ke dalam lingkungan akan mengubah sifat lingkungan itu, yang mengakibatkan berkurangnya fungsi ekosistem. Mikroorganisme memiliki berbagai mekanisme untuk beradaptasi dan mengkatabolisme hidrokarbon minyak bumi. Mekanisme untuk mendegradasi hidrokarbon yang dilakukan mikroorganisme melalui proses yang dikatalisis oleh enzim (Truskewycz *et al.*, 2019). Bakteri sebagai mikroorganisme memiliki kemampuan untuk degradasi senyawa hidrokarbon dan dikenal sebagai bakteri hidrokarbon oklastik karena memiliki kemampuan yang berpotensi mengikat, mengemulsi, mentranspor, dan mendegradasi hidrokarbon dengan cara memotong rantai hidrokarbon menjadi bagian yang lebih pendek.

Bakteri yang dapat mendegradasi hidrokarbon akan melibatkan kerja enzim alkane hidroksilase yang dikode oleh gen *alkB*. Bakteri hidrokarbon oklastik umumnya hidup pada substrat yang mengandung hidrokarbon tinggi karena bakteri membutuhkan hidrokarbon sebagai makanannya. Bakteri hidrokarbon oklastik ini memiliki enzim oksigenase yang terikat pada membrannya dan pada membran tempat terjadinya mekanisme untuk degradasi hidrokarbon yang tidak dapat larut pada air. Beberapa jenis bakteri berpotensi untuk menghasilkan biosurfaktan yang berguna untuk melakukan bioremediasi. Biosurfaktan merupakan zat yang dapat meningkatkan kelarutan hidrokarbon (Astuti dan Titah, 2020).

Bakteri pendegradasi hidrokarbon dapat berasal dari genus *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Brevibacterium*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, dan *Alcaligenes*. Lebih kurang 20 spesies dari bakteri dapat mendegradasi senyawa hidrokarbon





dari metana hingga senyawa dengan 40 atom karbon. Bakteri indigen seperti *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas pseudomallei*, dan *Micrococcus luteus* dapat juga digunakan dalam proses bioremediasi karena kemampuannya dalam memanfaatkan senyawa hidrokarbon menjadi sumber energi. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan lingkungan ekstrim, dengan kemampuan metabolisme pemecahan senyawa hidrokarbon dapat bekerja pada pH antara 6,5-7,5 (Xu *et al.*, 2018).

Jenis bakteri lain, dari genus *Enterobacter* juga merupakan bakteri yang memiliki proses metabolisme yang dapat mendegradasi senyawa hidrokarbon yaitu rantai alkana pendek menjadi alkohol kemudian menjadi asam lemak dengan produk transformasi akhir yaitu asam propionat dan asetat. Terjadinya proses degradasinya ditandai dengan peningkatan suhu tanah dan penurunan pH pada tanah (Prayitno, 2017). Mekanisme transpor hidrokarbon ke dalam sel bakteri dapat dilakukan melalui: 1) interaksi sel dengan hidrokarbon yang terlarut dalam fase air; 2) kontak langsung antara sel dengan tetesan hidrokarbon yang lebih besar dari sel bakteri, perlekatan ini hanya terjadi pada bakteri hidrofobik karena terdapat biosurfaktan pada permukaan membrannya. Pengambilan substrat hidrokarbon dengan melalui difusi maupun transpor aktif; dan 3) interaksi antara sel dengan tetesan hidrokarbon yang telah teremulsi dan tersolubilisasi oleh sel bakteri. Partikel hidrokarbonnya biasanya berukuran lebih kecil dari sel bakteri. Bakteri ini akan melepaskan biosurfaktan ke medium (Alabresm *et al.*, 2018).

Salah satu contoh produk dari hidrokarbon adalah minyak bumi dan cara untuk mengatasi tumpahan minyak bumi, yaitu dengan melakukan bioremediasi. Metode yang dapat dilakukan pada proses bioremediasi adalah dengan biostimulasi, yaitu penambahan nutrisi dengan kadar tertentu untuk mempercepat bioremediasi dan dapat juga dilakukan dengan biodegradasi, yaitu mengkulturkan mikroorganisme kemudian diisolasi dari lingkungan yang sama untuk ditumbuhkan dalam skala yang besar pada suatu reaktor hingga mikroorganisme tersebut mampu mendegradasi komponen dalam senyawa hidrokarbon menjadi CO₂ dan air (Yasmin dan Wulansarie, 2018). Nuryana (2017) menyatakan bahwa terdapat beberapa teknik dalam bioremediasi minyak bumi, di antaranya adalah sebagai berikut:

Biopile

Teknik ini dilakukan dengan cara mengalirkan oksigen untuk aerasi melalui pipa. Oksigen tersebut digunakan bakteri untuk proses metabolisme hidrokarbon. Apabila oksigen tidak merata, maka akan mengganggu pertumbuhan dan aktivitas bakteri pendegradasi.

Bulking Agent dan Isolasi Bakteri Petrofilik

Bulking agent memiliki kemampuan untuk menjaga poros tanah, sumber nutrisi, serta kelembaban. Beberapa bahan *bulking agent* yang dapat digunakan adalah kompos, sekam padi, dan serbuk gergaji. Adapun agen biosurfaktan dapat mendukung bakteri petrofilik untuk mengurangi ketegangan antar muka antara air dan minyak, karena bioagen dapat meningkatkan populasi bakteri petrofilik saat bioremediasi.



Konsorsium Bakteri

Adanya konsorsium bakteri dapat menunjang degradasi minyak bumi, karena setiap spesies bakteri memerlukan substrat spesifik untuk mendegradasi komponen minyak bumi. Tanaman dapat memberi oksigen dalam akar serta memperbesar pori-pori tanah untuk meningkatkan proses degradasi mikroorganisme. Contohnya tanaman lamtoro dan inokulasi bakteri *Micrococcus luteus* dan *Pseudomonas pseudoalcaligenes* yang dapat menghasilkan jumlah sel bakteri yang tinggi.

Landfarming

Percobaan tanpa bahan organik menghasilkan penurunan nilai TPH, sehingga memiliki kelebihan, yaitu proses lebih mudah dan tingkat penghilangan tinggi, tetapi membutuhkan lahan yang luas.

Bioremediasi In-Vitro

Teknik ini menggunakan kemampuan mikroorganisme secara alami, seperti bakteri hidrokarbon oklastik yang memiliki kemampuan secara genetik untuk mengikat, menggumpalkan, dan mendegradasi hidrokarbon.

Bioremediasi Ex-Situ

Dapat dilakukan dengan *slurry bioreactor* (Chikere *et al.*, 2019). Selain minyak bumi, contoh lain dari produk hidrokarbon adalah minyak solar. Minyak solar biasanya juga ditemukan pada sedimen perairan. Bakteri dari genus *Klebsiella*, *Bacillus*, *Citrobacter*, dan *Enterobacter* memiliki kemampuan untuk mendegradasi solar secara signifikan. Cara untuk mengidentifikasi isolat bakteri yang mampu mendegradasi minyak solar adalah dengan cara uji molekuler menggunakan gen 16S rRNA. Beberapa tahapan yang dilakukan adalah ekstraksi DNA, amplifikasi, elektroforesis, DNA sekuensing, dan analisis filogenetik. Proses degradasi minyak dapat diketahui dengan adanya penambahan dan pengurangan jumlah sel mikroba pada tiap satuan waktu. Bakteri mengalami kenaikan jumlah pada hari ke-7 (fase eksponensial, yaitu fase pertumbuhan bakteri sangat tinggi dan mengalami penurunan pada hari ke-14 (fase kematian, pertumbuhan bakteri rendah). Penurunan jumlah sel bakteri disebabkan oleh berkurangnya kadar nutrisi N dan P, karena nutrisi tersebut digunakan sebagai sumber nutrisi pertumbuhan. Jumlah sel bakteri akan bertambah selaras dengan penambahan minyak solar. Hal tersebut karena bakteri memanfaatkan unsur karbon dari minyak solar beserta ekstrak *yeast* (Prakoso *et al.*, 2020).

Bakteri hidrokarbon oklastik adalah bakteri yang mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon. Bakteri *Vibrio* adalah bakteri sedimen laut yang dapat mendegradasi rantai karbon dari senyawa *Polyaromatic Hydrocarbons* (PAHs) dengan bantuan enzim monooksigenase dan enzim dioksigenase dalam menghasilkan nutrisi untuk pertumbuhan. Enzim monooksigenase berperan mengoksidasi senyawa hidrokarbon alifatik menjadi asetil Co-A yang akan dimanfaatkan dalam katabolisme siklus asam nitrat. Sedangkan enzim dioksigenase berperan membentuk senyawa *catechol* dan mendegradasinya menjadi suksinat dan piruvat untuk siklus asam nitrat (Pratiwi *et al.*, 2019).



Bakteri Pendegradasi Plastik: Styrofoam

Styrofoam banyak digunakan untuk pengemasan banyak produk, mulai dari produk elektronik hingga produk makanan dan minuman. Limbah *styrofoam* dapat memberikan dampak negatif pada lingkungan, karena *styrofoam* membutuhkan waktu selama 1000 tahun untuk terurai secara sempurna, namun partikel-partikel hasil penguraian tersebut juga tetap akan mencemari tanah dan air tanah. Penggunaan *styrofoam* pada pengemasan makanan juga mengganggu kesehatan, karena *styrofoam* terbuat dari butiran *styrene* yang melalui proses menggunakan benzena. Saat digunakan untuk mengemas makanan dan minuman, benzena yang merupakan bahan berbahaya akan berpindah dari *styrofoam* ke makanan dan minuman tersebut (Hidayat *et al.*, 2020).

Styrofoam adalah *polistirena* golongan plastik nomor 6 yang lebih berbahaya dari plastik biasa. Pembuangan limbah *styrofoam* hanya akan mencemari lingkungan, maka digunakanlah metode biodegradasi dengan memanfaatkan bakteri dan jamur yang dapat mengurai polimer. Eksoenzim dari bakteri akan memecah polimer menjadi bagian yang lebih sederhana, yaitu *oligo polimer* yang mampu melewati membran *semipermeabel* bakteri dan akan dimanfaatkan untuk sumber karbon sehingga bakteri dapat menghasilkan CO₂ dan H₂O. Bakteri menghasilkan enzim untuk memecah *polistirena* menjadi *monomer stirena* dengan proses yang ramah lingkungan (Kim *et al.*, 2020).

Bakteri *indigenous* pendegradasi polimer sintetik dapat ditemukan di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Beberapa jenis bakteri yang dapat mendegradasi polimer sintetik adalah *Bacillus sp.*, *Mycobacterium sp.*, *Streptomyces sp.*, *Pseudomonas sp.*, dan *Staphylococcus sp.* Metode yang dapat digunakan untuk mengetahui adanya biodegradasi *styrofoam* adalah dengan metode Kolom *Winogradsky* yang dapat menekan konsorsium bakteri untuk membentuk *biofilm*. Konsorsium bakteri dapat melakukan banyak tugas dalam satu populasi (Moshood *et al.*, 2022).

Degradasi polimer membutuhkan mineralisasi lengkap beberapa enzim yang tidak terdapat pada strain bakteri, namun akan mudah dilakukan dalam suatu konsorsium. Salah satu contoh konsorsium adalah kultur dari *Aspergillus niger* dan *Lysinibacillus xylanilyticus* untuk mendegradasi *Low Density Polyethylene* (LDPE). Bakteri *Bacillus sp.* dan *Pseudomonas sp.* dapat mendegradasi *Brominated High-Impact Polystyrene*, sedangkan bakteri pengurai polimer lainnya adalah *Pseudomonas stutzeri*, *Alcaligenes faecalis*, *Pseudomonas putida*, *Comamonas acidovorans*, *Brevibacillus borstelensis*, *Staphylococcus sp.*, *Streptomyces sp.*, *Brevibacillus borstelensis*, *Pseudomonas chlororaphis*, dan *Rhodococcus rubbern* (Asiandu *et al.*, 2021).

Bakteri Pendegradasi Logam Berat

Tanah mengandung unsur logam yang berperan dalam proses fisiologis tanaman. Logam tersebut dapat berasal secara alamiah dari tanah dan dari limbah industri. Tentunya, limbah hasil industri mengandung zat pencemar bagi lingkungan. Limbah industri dapat menghasilkan logam berat, seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), dan kadmium (Cd). Maka dari itu, untuk menanggulangi pencemaran tanah oleh logam berat dapat digunakan teknik bioremediasi





menggunakan mikroorganisme yang menghasilkan enzim pendegradasi senyawa polutan (Widyasari & Wiratama, 2020).

Salah satu alternatif penanganan logam berat adalah bioremediasi menggunakan Bakteri Pereduksi Logam (BPL). Dinding sel bakteri mempunyai senyawa yang dapat mengikat ion-ion logam berat. Bakteri menggunakan ion tersebut sebagai penerima elektron dalam mendapatkan energi. Bakteri menggunakan penyangga berupa *zeolit* dalam bioremediasi (Murtafi'ah *et al.*, 2020). Untuk mengidentifikasi bakteri, dapat digunakan karakteristik biokimia, yaitu uji *Voges proskauer*, *triple sugar ion* agar, produksi indol, pengaruh pH, uji karbohidrat, uji *methyl red*, reduksi nitrat, dan motilitas. Untuk membentuk lapisan *film*, BPL dapat hidup pada lingkungan asam dan kandungan Mn, serta penambahan bahan organik. Sumber karbon yang digunakan dapat berasal dari serasah daun. Serasah daun ini juga berfungsi sebagai sumber elektron dan media pertumbuhan bakteri. Konsorsium BPL dengan penambahan serasah daun dapat menghidrolisis selulosa menjadi oligosakarida. Kurniawan *et al.*, (2019) mengisolasi bakteri pendegradasi selulosa dan menyatakan bahwa zona bening menunjukkan adanya aktivitas hidrolitik oleh enzim ekstraseluler selulosa yang diekskresikan oleh isolat bakteri. Selulosa dapat mengikat ion logam melalui gugus fungsi yang dimilikinya, terutama gugus hidroksil dan karboksil.

Mikroba indigen yang mampu tumbuh dalam media yang tercemar logam berat mempunyai indikasi bahwa bakteri tersebut dapat mengakumulasi logam berat dalam dinding selnya. Ion logam yang bermuatan positif secara elektrostatis akan terikat pada permukaan sel. Interaksi yang terjadi antara ion logam dengan bakteri *Bacillus sp.*, menunjukkan bahwa adanya peranan gugus karboksil pada peptidoglikan dan gugus fosforil pada polimer sekunder asam *teikoat* dan *teikuronat*. Nilai pH lingkungan juga berpengaruh terhadap kemampuan mikroorganisme untuk menjalankan fungsi selular, *transport* membran sel, maupun keseimbangan reaksi yang dilakukan oleh mikroorganisme. Maulana *et al.*, (2017) menyatakan bahwa *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis* mampu menjadi agen bioremediasi yang baik.

Salah satu zat yang termasuk ke dalam logam berat dan berbahaya bagi lingkungan adalah merkuri. Upaya pencemaran merkuri ini bisa dilakukan dengan cara bioaugmentasi. Bioaugmentasi adalah salah satu usaha detoksifikasi merkuri dengan menggunakan mikroorganisme resisten merkuri seperti bakteri resisten merkuri. Jenis bakteri yang resisten terhadap logam berat berada di dalam tanah dan di lokasi tambang. Jika bakteri tersebut bisa hidup di lingkungan dengan tingkat kontaminasi logam berat yang tinggi, maka diasumsikan bahwa bakteri tersebut akan sangat efektif dalam meningkatkan reduksi logam berat. Sejumlah bakteri yang resisten terhadap merkuri umumnya termasuk ke dalam bakteri baik gram positif maupun gram negatif. Tetapi bakteri gram negatif menunjukkan toleransi terhadap logam berat yang lebih besar dari pada gram positif karena gram positif memiliki struktur dinding sel yang lebih kompleks dan mampu mengikat serta mengimobilisasi ion logam termasuk Hg^{2+} (Du *et al.*, 2019).

Beberapa bakteri aerob dan fakultatif yang dapat mengkatalis proses reduksi $Hg(II)$ menjadi $Hg(0)$ berasal dari genus *Bacillus*, *Pseudomonas*,





Corynebacterium, *Micrococcus* dan *Vibrio*. *Pseudomonas maltophilia* dikatakan dapat mereduksi Cr^{6+} yang bersifat *mobile* dan toksik menjadi bentuk *immobile* dan non toksik serta menimbulkan ion toksik lainnya. Detoksifikasi merkuri oleh bakteri resisten merkuri terjadi karena bakteri tersebut mempunyai gen resisten merkuri yang disebut *mer operon*. Umumnya *mer operon* mempunyai struktur yaitu *merR* (gen Metaloregulator), *merT*, *merP*, *merC* (gen *transport* merkuri), *merA* (gen merkuri reduktase) dan *merB* (*organomercury liaise*) (Lutfi, 2018).

Beberapa bakteri seperti genus *Serratia*, *Shigella*, dan *Enterobacter* dimanfaatkan sebagai biodegradator merkuri, karena memiliki enzim merkuri reduktase yang dapat mengubah merkuri Hg^{2+} yang beracun menjadi ion merkuri yang kurang beracun. *Morganella morganii* diketahui juga sebagai bakteri yang mampu melakukan reduksi merkuri, bakteri ini dapat mendegradasi merkuri yang terakumulasi dalam tanah dan sering ditemui sebagai bakteri yang dapat beradaptasi pada daerah yang mengandung konsentrasi merkuri yang tinggi (d'Errico *et al.*, 2020). Selain itu, *Bacillus sp.* juga berpotensi sebagai agen bioremediasi, karena mempunyai jumlah dan keanekaragaman yang tinggi, bahkan dapat ditemukan di lingkungan yang ekstrim seperti pada lingkungan yang tercemar merkuri. Menurut Fauzi *et al.*, (2017) dalam penelitiannya menyatakan bahwa *Bacillus* berpengaruh terhadap kadar merkuri, pH air, dan suhu air. Penurunan kadar merkuri pada air sungai menurun ketika ditambahkan *Bacillus*. Pemberian populasi *Bacillus* sebanyak 20% berpengaruh pada pH air yang menjadi netral setelah dilakukan bioaugmentasi selama 24 jam (Du *et al.*, 2019).

Mekanisme resistensi bakteri terhadap merkuri ini terbagi menjadi dua, yaitu bioabsorpsi dan bioakumulasi. Bioabsorpsi merupakan mekanisme yang berkaitan dengan penggunaan bio polisakarida yang terdapat pada dinding sel anionik dari peptidoglikan yang merupakan komponen dari N-asetil muramik yang memiliki karboksil, yang menjadi tempat penyerapan logam berlangsung. Sedangkan bioakumulasi yaitu peran gen *mer operon* dalam degradasi. Melalui 2 mekanisme ini dapat terjadi pendegradasian senyawa merkuri organik (Abdullah, 2018). Gen *mer operon* merupakan gen yang mengkode merkuri reduktase dan *organomercurial lyase*. *Lyase* ini yang akan mereduksi senyawa organik yang bersifat toksik seperti metil merkuri dan fenil merkuri asetat. Gen *mer operon* yang berada pada bakteri yaitu gen *merA* dan *merB*. *Mer operon* ini berpotensi untuk aplikasi remediasi melalui bioabsorpsi dengan melibatkan biomassa bakteri (Afianti, 2018)

Selain merkuri, zat logam berat lainnya adalah kromium. Kromium adalah salah satu logam berat yang banyak digunakan pada industri *electroplating*, industri logam, pendingin air, *pulp*, pemurnian bijih, dan *petroleum*. Pada bidang pertanian, kromium dapat muncul akibat penggunaan pestisida dan kompos. Kromium di alam umumnya ada dua bentuk, yaitu Cr^{3+} dan Cr^{6+} . Cr^{3+} adalah bentuk yang cenderung teradsorpsi di permukaan tanah atau terendap dalam bentuk kromium hidroksida. Sedangkan Cr^{6+} adalah bentuk yang tidak stabil dan sering ditemukan dalam bentuk kromat dan dikromat (Setiyono & Gustaman, 2017).





Bacillus subtilis dan *Azotobacter S8* merupakan bakteri yang resisten terhadap logam kromium. Menurut Awaluddin & Bieby (2020), bakteri *Bacillus subtilis* mempunyai tingkat *removal* yang lebih tinggi dari pada *Azotobacter S8*. *Azotobacter S8* merupakan bakteri yang mempunyai berbagai macam bentuk ukuran. Termasuk ke dalam bakteri gram negatif, *polymorphic*, dan merupakan bakteri pemfiksasi nitrogen. *Azotobacter S8* melimpah di tanah, perairan dan sedimen perairan. *Azotobacter S8* mempunyai kemampuan dalam melakukan penyisihan logam berat yang disebabkan oleh komponen polimer ekstraseluler bernama eksopolisakarida (EPS) yang dalam hal ini dapat mengikat polutan logam. Sedangkan bakteri *Bacillus subtilis* merupakan bakteri gram positif yang berbentuk basil atau batang. *Bacillus subtilis* merupakan bakteri *aerob* yang membutuhkan kadar oksigen yang tinggi. *Bacillus subtilis* mampu hidup di lokasi yang tercemar oleh logam berat (Alotaibi *et al.*, 2021)

Bakteri Pendegradasi Ammonium Nitrogen

Pencemaran nitrogen di perairan dapat menyebabkan eutrofikasi yang dapat merusak ekosistem perairan. Nitrogen di dalam air dapat berubah melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Pada proses nitrifikasi, senyawa anorganik amonia diubah menjadi nitrit kemudian menjadi nitrat dengan bantuan bakteri nitrifikasi. Sedangkan, pada proses denitrifikasi, nitrat diubah menjadi N_2O . Bakteri *heterotrof* dan bakteri nitrifikasi-denitrifikasi adalah mikroorganisme yang membutuhkan oksigen untuk mengoksidasi senyawa amonia menjadi nitrat. Kandungan nitrat yang sangat tinggi menandakan bahwa kandungan amonium yang terkandung dalam air cukup tinggi. Bakteri pendegradasi amonia dapat mengasimilasi nitrogen amonia sebagai sumber nitrogen untuk mendorong pertumbuhan dan reproduksi mereka, menyediakan cara Biologis yang ramah lingkungan, berbiaya rendah dan aman untuk mengurangi emisi ammonia di lingkungan (Xiao *et al.*, 2018).

Bioremediator yang tepat harus memiliki bakteri yang mampu membersihkan limbah berkarbon secara efektif. Salah satu contoh bioremediator detritus organik adalah bakteri dari genus *Bacillus* dan *Phenibacillus*. Komunitas bakteri dan karbohidrat dapat membentuk lapisan tipis pada permukaan benda yang dimasukkan ke dalam perairan laut yang disebut dengan *biofilm*. Komunitas bakteri tersebut akan menurunkan kandungan amonia dan limbah organik serta meningkatkan kandungan nitratnya melalui proses nitrifikasi dan amonifikasi. *Biofilm* dapat terbentuk dengan adanya sinyal interseluler dan transkripsi gen berbeda dari mikroba planktonik. Komunitas bakteri yang dapat tumbuh pada *biofilm* adalah *Agrobacterium vitis*, *Staphylococcus saprophyticus*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus megaterium*, dan *Micrococcus luteus* (Hendrawan *et al.*, 2021).

Berdasarkan morfologi, mayoritas bakteri laut diketahui berbentuk batang dan bersifat gram negatif. *Pleomorfisme* umum terjadi pada bakteri laut. Sekitar seperlima bakteri batang dari laut berbentuk kumparan *helicoid*, sehingga sering diklasifikasikan sebagai *Vibrio* atau *Spirillum*. Bakteri laut bergerak secara aktif. Diperkirakan kemampuan bergerak ini sebagai hasil adaptasi kehidupan perairan. Jenis-jenis *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, dan *Bacterium*





merupakan jenis terbanyak yang dijumpai di laut. Bakteri membentuk lapisan *film* yang terkadang menjadi pelapis luar cat *antifouling*, sehingga tidak berpengaruh terhadap organisme *fouling*. Secara perlahan bakteri akan merombak senyawa penyusun pelapis (Yuka, 2021)

Bacillus megaterium, merupakan kelompok bakteri yang banyak ditemukan di tanah. Bakteri ini merupakan kelompok bakteri *endofit* dan *heterotrof* yang membutuhkan karbon organik dan nitrogen anorganik sebagai sumber energi. Bakteri ini mampu memanfaatkan amonium dan nitrat sebagai sumber nitrogen serta dapat menurunkan kadaramonia dalam perairan. Cara penguraian limbah, yaitu dengan cara oksidasi yaitu pemecahan senyawa kompleks menjadi sederhana (Kim *et al.*, 2021)

Pada sebuah tambak udang, limbah organik yang dihasilkan dapat berasal dari sisa pakan maupun feses hewan ternak. Limbah organik dapat meningkatkan kadar amonia yang toksik bagi biota air dengan batas tertinggi 0,1 mg/l. Bakteri pengurai (probiotik) telah digunakan untuk mempercepat penurunan kadar bahan organik dan amonia, namun hasilnya tidak selalu baik, karena bakteri probiotik membutuhkan lingkungan yang kondusif. Kandungan nitrogen dalam air limbah berupa senyawa nitrogen organik maupun ion, seperti NO_2^- , NH_4^+ , dan NO_3^- . Limbah dengan konsentrasi nitrogen yang tinggi dapat menyebabkan keperluan O_2 menjadi lebih banyak, eutrofikasi, menurunkan kualitas air, serta membahayakan ekosistem (Nsoe *et al.*, 2018).

Bakteri yang Dimanfaatkan sebagai Biodegradator Bahan Amilum, Selulosa dan Lemak

Selain senyawa hidrokarbon dan merkuri, terdapat beberapa bakteri yang dimanfaatkan sebagai agen bioremediasi bahan organik seperti *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Acinetobacter* sp. Ketiga bakteri ini bersinergi dalam biodegradasi bahan cemar organik dalam limbah, karena bakteri ini dapat menghasilkan enzim proteolitik, amilolitik, lipolitik, dan antibakteri pada bakteri *vibrosis* yaitu kelompok *marine bacteria* (Novriyanti, 2021). Bakteri genus *Bacillus* merupakan salah satu contoh bakteri amilolitik yang berperan penting bagi pengelolaan limbah yang mengandung banyak amilum, bakteri ini banyak dimanfaatkan sebagai bioremediator lingkungan tambak karena dapat mendegradasi pati dan glikogen pada air dan tanah kolam (Novitasari *et al.*, 2021).

Bakteri proteolitik berasal dari genus *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Proteus*, *Streptobacillus*, dan *Staphylococcus*. Bakteri ini mempunyai kemampuan untuk menghasilkan protease yang disekresikan ke lingkungan. Enzim protease akan menghidrolisis senyawa-senyawa bersifat protein menjadi oligopeptida, peptida rantai pendek, dan asam amino. Keberadaan enzim protease sangat penting bagi kehidupan bakteri, karena menyediakan kebutuhan nitrogen yang dapat diangkut ke dalam sel. Jenis-jenis bakteri yang mempunyai kemampuan mensekresikan enzim protease adalah bakteri yang mempunyai potensi besar digunakan sebagai agensi pembersih bahan pencemar yang bersifat protein. Bakteri penghasil enzim protease akan menghasilkan zona bening jika dilakukan uji penghasilan enzim protease (Maristiasa *et al.*, 2019).





Bakteri *Cellulomonas*, *micrococcus*, dan *Rhodothermus* merupakan kelompok bakteri yang dapat dimanfaatkan sebagai biodegradator bahan organik seperti selulosa. Bakteri selulolitik adalah bakteri penghasil enzim selulase yang merupakan respon karena adanya selulosa pada lingkungannya. Uji aktivitas selulase dapat dilihat dari indeks selulase yang terbentuk. Indeks selulase merupakan nisbah antara zona bening dengan diameter koloni. Semakin besar indeks selulolitik yang dihasilkan maka akan semakin besar pula enzim yang dihasilkan oleh isolate bakteri tersebut (Pamungkas *et al.*, 2018).

Dalam bidang industri kelapa sawit, bakteri *Cellulomonas*, *micrococcus*, dan *Rhodothermus* berperan dalam mengubah selulosa menjadi kompos. Beberapa bakteri aerobik dimanfaatkan oleh industri gula sebagai biodegradator produk sampingan gula, yaitu molase yang bersifat cair. Bakteri ini akan memanfaatkan molase sebagai nutrisi tumbuhnya, akibat dari metabolisme yang dilakukan oleh bakteri ini, akan menyebabkan degradasi bahan yang sukar diuraikan (*Non biodegradable*). Bakteri *Bacillus* sp. juga banyak dimanfaatkan pada pelabuhan karena dapat menurunkan lemak dan minyak pada permukaan air, bakteri ini memiliki enzim lipase yang dapat menguraikan minyak dan lemak (Basitoh *et al.*, 2018; S *et al.*, 2019).

SIMPULAN

Bioremediasi adalah mekanisme Biologis oleh mikroorganisme bakteri untuk mendaur ulang polutan menjadi bentuk lain yang dapat digunakan oleh bakteri tersebut melalui proses yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Beberapa senyawa yang dapat didegradasi oleh bakteri adalah hidrokarbon (termasuk minyak bumi), minyak solar, merkuri, ammonia nitrogen, selulosa, amilum, lemak, *styrofoam*, kromium, dan logam berat. Berbagai jenis bakteri melakukan mekanisme khusus seperti biostimulasi, bioaugmentasi bioabsorpsi, biolisis, dan bioakumulasi. Kajian mengenai bakteri yang berperan dalam bioremediasi ini dapat dijadikan sebagai dasar untuk pengembangan penelitian lanjut untuk dapat memanfaatkan bakteri dalam mengatasi masalah lingkungan.

SARAN

Penelitian mengenai bioremediasi lingkungan dapat terus dieksplorasi dengan menggunakan mikroba dari jenis yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, sehingga tulisan ini dapat terselesaikan.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah. (2018). Deteksi Keberadaan Bakteri Resisten Logam Merkuri (Hg) pada Penambangan Emas Tanpa Izin (PETI) di Simpi, Sendau, Kalimantan Barat. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 1(2), 56-61.
- Adlan, N.A., Sabri, S., Masomian, M., Ali, M.S.M., and Rahman, R.N.Z.R.A. (2020). Microbial Degredation of Parrafin Wax in Malaysia Crude Oil





- Mediated by Degredative Enzym. *Frontiers in Microbiology*, 11(Article 565608), 1-15.
- Afianti, N.F. (2018). Potensi Bakteri Laut untuk Bioremediasi. *Jurnal Oseana*, 43(4), 18-27.
- Alabresm, A., Chen, Y.P., Decho, A.W., and Lead, J. (2018). A Novel Method for the Synergistic Remediation of Oil-Water Mixtures Using Nanoparticles and Oil Degrading Bacteria. *Science of the Total Environment*, 630(2018), 1292-1297.
- Alotaibi, B.S., Khan, M., and Shamin, S. (2021). Unraveling the Underlying Heavy Metal Detoxification Mechanism of Bacillus Species. *Microorganism*, 9(8), 16-28.
- Asiandu, A.P., Wahyudi, A., dan Sari, S.W. (2021). A Review: Plastics Waste Biodegradation Using Plastics-Degrading Bacteria. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 9(1), 148-157.
- Astuti, D.A., dan Titah, H.S. (2020). Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di Wilayah Pesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), 112-116.
- Awaluddin, M., dan Bieby, V.T. (2020). Studi Literatur Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Kromium di Kecamatan Jetis, Kabupaten Mojokerto Menggunakan Bakteri Azotobacter S8 dan Bacillus substilis. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), 185-190.
- Basitoh, Y.K., Suarsini, E., dan Prabaningtyas, S. (2018). Eksplorasi Bakteri Amilolitik Potensial dari Ranu Pani, Ranu. *Jurnal Ilmu Hayat*, 3(2), 52-63.
- Chen, Q., Li, J., Sun, H., and Bao, M. (2017). Study on Biodegradation of Crude Oil by Free and Immobilized Bacterial Consortium in Matrine Enviroment. *PloS ONE*, 12(3), 1-23.
- Chikere, C.B., Tekere, M., and Adeleke, R. (2019). Enhanced Microbial Hydrocarbon Biodegradation as Stimulated During Field-Scale Landfarming of Crude Oil-Impacted Soil. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 14(4), 1-10.
- d'Errico, G., Aloj, V., Ventrino, V., Bottiglieri, A., Comite, E., Ritieni, A., Marra, R., Censi, S.B., Flematti, G.R., Pepe, O., and Vinale, F. (2020). Methyl T-Butyl Ether-Degradatung Bacteria for Bioremediation and Biocontrol Purpose. *PloS ONE*, 15(2): 228-936.
- Du, H., Ma, M., Igarashi, Y., and Wand, D. (2019). Biotic and Abiotic Degradation of Methylmercury in Aquatic Ecosystem: A Review. *Bull Environ Contam Toxicol*, 102(5), 605-611.
- Fauzi, S.R., Cut, M., dan Rahayu, A.F. (2017). Bioaugmentasi Tercemar Limbah Merkuri di Krueng Sabee Aceh Jaya Menggunakan Isolat Bacillus. *Jurnal Penelitian Pertanian*, 13(3), 46-53.
- Gworek, B., Dmuchowski, W., and Dąbrowska, A.H.B. (2020) Mercury in the Terrestrial Environment: A Review. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 1-19.



- Hendrawan, A.K.F., Afiati, N., dan Rahman, A. (2021). Laju Nitrifikasi pada Bioremediasi Air Limbah Organik Menggunakan *Chlorella* sp. dan Bakteri Nitrifikasi-Denitrifikasi. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 11(2), 309-323.
- Hidayat, T.R., Indrawati, I., dan Herlina, T. (2020). Isolasi dan Identifikasi Bakteri Pendegradasi Styrofoam Asal Tanah Tempat Pembuangan Akhir Sarimukti Bandung. *Jurnal Pendidikan dan Biologi*, 12(2), 110-116.
- Kim, H.R., Lee, H.M., Yu, H.C., Jeon, E., Lee, S., Li, J., and Kim, D.H. (2020). Biodegradation of Polystyrene by *Pseudomonas* sp. Isolated from the Gut of Superworms (Larvae of *Zophobas atratus*). *Environmental Sciences & Technology*, 54(11), 6987-6996.
- Kim, K., Jung, J.Y., and Kwon, J.H. (2021). Potential of Bacterial Strains Isolated from Coastal Water for Wastewater Treatment and as Aqua-Feed Additives. *Microorganisms*, 9(12), 24-41.
- Kurniawan, A., Sari, S.P., Asriani, E., Kurniawan, A., Sambah, A.B., Triswiyana, B., dan Prihanto, A.A. (2019). Kapasitas Hidrolisis Bakteri Pendegradasi Selulosa dari Ekosistem Mangrove. *Journal of Tropical Marine Science*, 2(2), 76-82.
- Lutfi, S.R. (2018). Bioremediasi Merkuri Menggunakan Bakteri Indigenous dari Limbah Penambangan Emas di Tumpang Pitu Banyuwangi. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 19(1), 15-24.
- Lwanga, E.H., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., and Garbeva, P. (2018). Decay of Low-Density Polyethylene by Bacteria Extracted from Earthworm's Guts: A Potential for Soil Restoration. *Science of the Total Environment*, 624(2018), 753-757.
- Maristiasa, N.P., Wardoyo, F.A., Darmawati, S., dan Ethica, S.N. (2019). Isolasi dan Uji Tingkat Patogenitas Bakteri Proteolitik untuk Bioremediasi Limbah Industri Tahu. In *Seminar Nasional UNIMUS : Tantangan Implementasi Hasil Riset Perguruan Tinggi untuk Industrialisasi* (pp. 164-170). Semarang, Indonesia : Universitas Muhammadiyah Semarang.
- Maulana, A., Supartono., dan Mursiti, S. (2017). Bioremediasi Logam Pb pada Lmbah Tekstil dengan *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus substilis*. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 6(3), 256-261.
- Melati, I. (2020). *Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan dan Prospek Riset*. Cibinong: Pusat Penelitian Limnologi LIPI.
- Moshood, T.D., Nawansir, G., Mahmud, F., Mohamad, F., Ahmad, M.H., and Ghani, A.A. (2022). Biodegradable Plastic Applications toward Sustainability: A Recent Innovation in the Green Product. *Cleaner Engineering and Technology*, 6(2022), 1-14.
- Murtafi'ah, N., Fadhilah F.R., dan Kodariah, L. (2020). Pengaruh Penambahan Serasah Daun *Muntingia calabura* terhadap Aktivitas Konsorsium Bakteri Kotoran Kambing dalam Bioremediasi Logam Mn pada Limbah Rumah Sakit. *Jurnal Biotek Medisiana Indonesia*, 10(1), 49-64.
- Novitasari, D.T., Purnomo, P.W., Jati, O.E., Ayuningrum, D., dan Sabdaningsih, A. (2021). Skrining Bakteri Penghasil Enzim Amilase dari Sedimen





- Tambak Udang Vannamei (*Litopenaeus vannamei*). *JFMR-Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(2), 297-303.
- Novriyanti, D. (2021). Skrinning Bakteri Penghasil Amilase dari Sedimen Tambak Vannamei. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 5(2), 297-303.
- Nsoe, M.N., Kofa, G.P., Ndi, K.S., Mohammadou, B., and Kayem, G.J. (2018). Biodegradation of Ammonium Ions and Formate Metabolism by *Yarrowia polytica* and *Picia guilliermondii* in a Batch Reactor, *Water Air Soil Pollut*, 229(5), 1-9.
- Nuryana, D. (2017). Review: Bioremediasi Pencemaran Minyak Bumi. *Journal of Earth Energy Engineering*, 6(2), 9-13.
- Pamungkas, N.D., Firmansyah, A., dan Ethica, S.N. (2018). Isolasi dan Uji Patogenitas Bakteri Indigen Penghasil Enzim Selulase dari Limbah Ampas Kelapa di Pasar Tradisional Ngawen untuk Bioremediasi. In *Seminar Nasional Mahasiswa UNIMUS* (pp. 261-267). Semarang, Indonesia : Fakultas Ilmu Keperawatan dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Semarang.
- Prakoso, B.E., Widianingsih, W., dan Sunaryo, S. (2020). Bakteri Pendegradasi Solar Dari Sedimen Perairan dalam Skala Laboratorium (In Vitro). *Journal of Marine Research*, 9(4), 453-463.
- Pratiwi, N.T.M., Hariyadi, S., Ayu, I.P., Apriadi, T., Iswantari A., dan Wulandari D.Y. (2019). Pengelolaan Kandungan Bahan Organik pada Limbah Cair Laboratorium Proling-MSP-IPB dengan Berbagai Macam Agen Bioremediasi. *Jurnal Biologi Indonesia*, 5(1), 89-95.
- Prayitno, J. (2017). Uji Coba Konsorsium Mikroba dalam Upaya Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak dengan Menggunakan Teknik Landfarming Skala Bangku. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2), 208-215.
- S, W.Y.C., Sasmita, A., dan Elystia, S. (2019). Pengaruh Penambahan Medium Nutrient Broth (NB) terhadap Pertumbuhan *Bacillus* sp. pada Bioremediasi BOD, COD, Minyak, dan lemak di Air Permukaan. *JOM FTEKNIK*, 6(2), 1-6.
- Sambu, A.A. (2021). Efektivitas Bakteri Nitrifikasi dan Denitrifikasi pada Limbah Organik Budidaya Udang Vannamei. *Jurnal Harpodon Borneo*, 14(2), 102-110.
- Setiyono, A., dan Gustaman, R.A. (2017). Pengendalian Kromium yang Terdapat di Limbah Batik dengan Metode Fitoremediasi. *Unnes Journal of Publish Health*, 6(3), 156-160.
- Shabbir, S., Faheem, M., Ali, N., Kerr, P.G., Wang, L.F., Kuppusamy, S., and Li, Y. (2020). Pheriphytic Biofilm: An Innovative Approach for Biodegradation of Microplastic. *Science of the Total Environment*, 717(Article 137064), 1-11.
- Truskewycz, A., Gundry, T.D., Khudur, L.S., Kolobaric, A., Taha, M., Medina, A.A., Ball, A. S., and Shahsavari, E. (2019). Petroleum Hydrocarbon Contamination in Terrestrial Ecosystems-Fate and Microbial Responses. *Journal Molecules*, 24(18), 1-20.



- Villaverde, J., Bellido, M.R., Merchan, F., and Morrilo, E. (2017). Bioremediation of Diuron Contaminated Soil by a Novel Degrading Microbial Consortium. *Journal of Environmental Management*, 188(2017), 379-386.
- Widyasari, N.L., dan Wiratama, I.G.N.M. (2020). Studi Teknik Bioremediasi Tanah Tercemar Logam Berat dengan Menggunakan Eco-Enzyme. *Jurnal Ecocentrism*, 1(2), 89-95.
- Xiao, X., Mazza, L., Yu, Y., Cai, M., Zheng, L., Tomberlin, J.K., Yu, J., Huis, A.V., Yu, Z., Fasulo, S., and Zhang, J. (2018). Efficient Co-Conversion Process of Chicken Manure into Protein Feed and Organic Fertilizer by *Hermetia Illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae) Larvae and Functional Bacteria. *Journal of Environmental Management*, 217(2018), 668-676.
- Xu, X., Liu, W., Tian, S., Wang, W., Qi, Q., Jiang, P., Gao, X., Li, F., Li, H., and Yu, H. (2018). Petroleum Hydrocarbon-Degrading Bacteria for the Remediation of Oil Pollution Under Aerobic Conditions: A Perspective Analysis. *Front. Microbiol*, 9(Article 2885), 1-11.
- Yasmin, Z., dan Wulansarie, R. (2018). Review Perbandingan Pencemaran Minyak di Perairan dengan Proses Bioremediasi Menggunakan Metode Biostimulus dan Bioaugmentasi. *Jurnal Reka Buana*, 3(1), 67-72.
- Yuka, R.A. (2021). Identifikasi Bakteri Bioremediasi Pendegradasi Total Amonia Nitrogen (TAN). *Jurnal Kelautan*, 14(1), 20-29.