

REVIEW : KAJIAN POTENSI BAKTERI ENDOFIT SEBAGAI AGEN BIODEGRADASI LINEAR ALKYL BENZENE SULFONATE (LAS)

Arini Nurul Mahmudah¹, Hanik Faizah^{2*}, & Misbakhul Munir³

^{1,2,&3}Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya, Jalan Dr. Ir. H. Soekarno Nomor 682, Surabaya, Jawa Timur 60294, Indonesia

*Email: hanikfaizah@uinsby.ac.id

Submit: 19-12-2023; Revised: 26-02-2024; Accepted: 26-04-2024; Published: 30-06-2024

ABSTRAK: *Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)* merupakan salah satu jenis surfaktan anionik yang umum digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan deterjen atau pembersih komersial. Meskipun LAS dapat terdegradasi secara alami pada lingkungan, namun air limbah deterjen yang mengandung LAS masih perlu diolah dengan benar sebelum dibuang ke lingkungan. Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam mengurangi efek toksik dari LAS adalah biodegradasi. Penggunaan bakteri, khususnya bakteri endofit yang berasosiasi dengan tanaman, diketahui berpotensi sebagai agen biodegradasi LAS. *Review* ini bertujuan untuk mengkaji mengenai potensi bakteri endofit sebagai agen biodegradasi LAS. Metode yang digunakan dalam *review* ini adalah tinjauan literatur dari beberapa referensi Jurnal Internasional maupun Jurnal Nasional. Data dianalisis secara deskriptif dan disajikan dalam bentuk narasi dan tabel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa spesies bakteri endofit yang diisolasi dari berbagai jenis tanaman berpotensi dalam mendegradasi polutan, seperti logam berat, benzene, fenol, phenanthrene (PHE), solar, ammonium, fosfat, COD, dan hidrokarbon yang juga menunjukkan bahwa bakteri endofit berpotensi dapat mendegradasi LAS.

Kata Kunci: Bioremediasi, Bakteri Endofit, *Linear Alkylbenzene Sulfonate*.

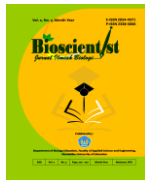
ABSTRACT: *Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)* is a type of anionic surfactant which is commonly used as a raw material in making commercial detergents or cleaners. Even though LAS can be degraded naturally in the environment, detergent wastewater containing LAS still needs to be treated properly before being discharged into the environment. One way that can be done to reduce the toxic effects of LAS is biodegradation. The use of bacteria, especially endophytic bacteria associated with plants, is known to have potential as a biodegradation agent for LAS. This review aims to examine the potential of endophytic bacteria as LAS biodegradation agents. The method used in this review is a literature review from several international and national journal references. Data were analyzed descriptively and presented in narrative and table form. The results of the research show that several species of endophytic bacteria isolated from various types of plants have the potential to degrade pollutants, such as heavy metals, benzene, phenol, phenanthrene (PHE), diesel, ammonium, phosphate, COD, and hydrocarbons which also shows that endophytic bacteria have the potential to degrade LAS.

Keywords: Bioremediation, Endophytic Bacteria, *Linear Alkylbenzene Sulfonate*.

How to Cite: Mahmudah, A. N., Faizah, H., & Munir, M. (2024). Review : Kajian Potensi Bakteri Endofit sebagai Agen Biodegradasi *Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)*. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(1), 733-744. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i1.10181>



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

Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) merupakan salah satu jenis surfaktan anionik yang umum digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan deterjen atau pembersih komersial. Penggunaan LAS semakin bertambah setelah dilarangnya penggunaan jenis surfaktan anionik lain, yaitu *Alkyl Benzene Sulfonate* (ABS) karena sifatnya yang tidak dapat terdegradasi secara alami. LAS dibentuk oleh rantai alkil yang terikat dengan cincin benzena pada posisi para relatif terhadap gugus sulfonat. Surfaktan ini tersusun dari campuran senyawa homolog yang panjang rantai alkilnya bervariasi dari 10 hingga 14 atom karbon (Flores *et al.*, 2021). Meskipun LAS dapat terdegradasi secara alami pada lingkungan, namun air limbah deterjen yang mengandung LAS masih perlu diolah dengan benar sebelum dibuang ke lingkungan. Hal tersebut perlu dilakukan karena degradasi LAS tidak akan bekerja secara efektif apabila terjadi dalam keadaan anaerobik. Selain itu, kekeruhan yang tinggi juga dapat menghalangi cahaya matahari yang masuk, sehingga memperlambat proses degradasi LAS. Proses degradasi LAS yang lambat akan meningkatkan kandungan LAS dalam air hingga pada level toksik yang berpotensi membahayakan kehidupan organisme akuatik (Rizky *et al.*, 2020).

Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam mengurangi efek toksik dari LAS adalah biodegradasi. Biodegradasi merupakan proses pemecahan bahan kimia melalui aktivitas metabolik mikroorganisme. Biodegradasi meningkatkan proses penghilangan surfaktan ini dari lingkungan, sehingga dapat mengurangi dampak buruknya bagi biota. Selama proses biodegradasi, surfaktan dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber nutrisi dan energi. Faktor utama yang dapat mempengaruhi biodegradasi surfaktan adalah struktur bahan kimianya, konsentrasi dan karakteristik fisikokimia media lingkungan dimana mereka ditemukan (Osadebe *et al.*, 2018). Penggunaan bakteri, khususnya bakteri endofit yang berasosiasi dengan tanaman diketahui berpotensi sebagai agen biodegradasi LAS.

Bakteri endofit merupakan bakteri yang hidup di dalam suatu tanaman dan bersimbiosis dengan tanaman tersebut. Bakteri endofit diketahui memiliki kemampuan untuk meningkatkan reaksi tanaman terhadap tekanan biotik dan abiotik, serta membantu tanaman mengatasi kekeringan, kekurangan nitrogen, salinitas, dan patogen dengan lebih baik. Sedangkan bakteri endofit mendapatkan keuntungan, yaitu persaingan dalam mendapatkan nutrisi lebih sedikit dan secara fisik terlindungi dari kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Bakteri ini juga terlibat dalam meningkatkan resistensi tanaman terhadap logam berat dan bioremediasi deterjen serta polutan lain yang terdapat di tanah (Iqbal *et al.*, 2017). Namun penelitian mengenai kemampuan bakteri endofit dalam mendegradasi LAS masih terbatas, sehingga diperlukan pengkajian lebih lanjut mengenai potensi dan kemampuan degradasi LAS oleh bakteri endofit tersebut. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk memberikan referensi bagi penelitian selanjutnya mengenai potensi dan kemampuan bakteri endofit dalam mendegradasi LAS.

METODE

Artikel *review* ini disusun berdasarkan hasil penelusuran data dan informasi dari Jurnal Internasional yang bereputasi dan Jurnal Nasional yang terindeks SINTA 1-6 yang digunakan sebagai sumber data dan informasi dengan tahun publikasi jurnal di antara rentang tahun 2014-2023. Pencarian dilakukan dengan menggunakan kata kunci bahasa Indonesia dan bahasa Inggris pada *Google Scholar* menggunakan “LAS, biodegradasi, dan bakteri endofit”. Jurnal yang diperoleh diseleksi berdasarkan judul dan abstrak. Data hasil penelitian dari jurnal yang telah diseleksi, kemudian dianalisis dengan metode deskriptif, yaitu jurnal yang sudah terkumpul dan memenuhi kriteria secara inklusi diubah dalam bentuk narasi dan dalam bentuk tabel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

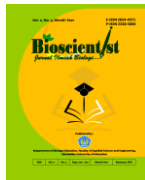
LAS merupakan kategori bahan kimia xenobiotik yang memiliki gugus sulfonasi atau ester sulfat. LAS komersial mengandung rantai alkil linier (10-14 atom karbon), cincin benzena, dan gugus tersulfonasi. Campuran berbagai panjang rantai alkil (C10 hingga C13 atau C14) dan isomer posisi fenil yang berbeda dari 2 hingga 5-fenol (2 hingga 5-fenil-fenil) dibuat dengan mengontrol proporsi bahan awal dan kondisi reaksi yang berbeda, kemudian campuran tersebut diaromatisasi dengan posisi para tersulfonasi dengan rantai alkil linier dan melekat pada cincin aromatik dimana saja kecuali pada karbon terminal (1-fenil) (Indah & Safnowandi, 2020; Kaida *et al.*, 2021). LAS adalah molekul amfipatik yang memiliki komponen hidrofilik dan hidrofobik dalam satu molekul. Komponen hidrofobik dapat mengandung satu rantai atau hingga empat rantai, sedangkan komponen hidrofilik dapat berupa gugus polar bermuatan atau tidak bermuatan. LAS memiliki berat molekul yang tinggi dan struktur kompleks (Ogawa & Kawase, 2021).



Gambar 1. Rumus Kimia LAS (Kaida *et al.*, 2021).

Penggunaan LAS dalam Industri

LAS umumnya digunakan sebagai bahan tambahan dalam berbagai keperluan industri, seperti industri kosmetik, serta untuk membuat bahan pembersih utama rumah tangga, seperti bubuk *laundry*, cairan *laundry*, cairan pencuci piring, dan pembersih rumah tangga lainnya dengan konsentrasi hingga 25% pada produk konsumen, sedangkan sebanyak 30% pada produk komersial. LAS juga digunakan sebagai emulsifier, emulsifier untuk cat & pelapis, dan lain-lain dalam industri.



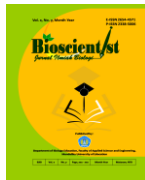
Toksisitas LAS di Lingkungan

LAS dicerna oleh manusia dengan konsentrasi berkisar antara 5 g hingga 1 kg per hari melalui air minum, makanan, dan kontak kulit. Meskipun LAS dapat terurai secara alami, LAS berbahaya bagi organisme akuatik dan manusia dikarenakan bioakumulasi dan persistensinya (Siyal *et al.*, 2020). Keberadaan LAS di lingkungan perairan diketahui dapat menyebabkan keracunan bagi organisme akuatik dan satwa liar (Ogawa & Kawase, 2021). Konsentrasi LAS yang diamati di perairan permukaan dapat mempengaruhi perkembangan, reproduksi, dan perilaku berenang ikan. Paparan LAS juga mengakibatkan perubahan besar pada struktur histologis hati dan insang ikan (Gouda *et al.*, 2022). LAS menginduksi pertumbuhan akut, efek toksik biologis reproduksi, neurologis, dan molekuler pada organisme. LAS pada konsentrasi non sitotoksik dalam limbah dapat meningkatkan laju pertumbuhan sel kanker usus besar melalui proliferasi sel (Bradai *et al.*, 2016). Selain itu, LAS dapat mengakibatkan berkurangnya produktivitas primer lingkungan perairan, sehingga rantai makanan organisme perairan juga terpengaruh. Rantai karbon LAS mengandung ujung hidrofobik yang menentukan potensi toksik, dan toksisitas LAS meningkat seiring dengan panjangnya rantai karbon (Belanger *et al.*, 2016). Bahaya dampak kronis akibat paparan LAS dalam jangka panjang menjadi perhatian besar dalam pengembangan standar kualitas air dan penilaian risiko lingkungan (Luo *et al.*, 2023).

Pengelolaan limbah deterjen, khususnya LAS dapat dilakukan dengan membuang produk limbah, kemudian dikirim ke fasilitas pengolahan air limbah yang dapat disaring dan dibersihkan untuk digunakan kembali. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penghilangan LAS dalam pengolahan air limbah dapat dilakukan melalui metode fisika, kimia, dan biologi. Degradasi dengan mikroba atau biodegradasi merupakan jalur utama penghilangan LAS pada sebagian besar sistem lumpur aktif yang menyebabkan kandungan LAS dalam air limbah mengalami penurunan secara menyeluruh. Setelah digunakan, LAS biasanya dikeluarkan melalui sistem drainase. Ketika mencapai sedimen, LAS dapat terdegradasi hingga 99% oleh konsorsium mikroba yang ada di ekosistem lokal. Mengenai toksisitasnya, telah diketahui bahwa 0,9 mg/l LAS dapat menyebabkan penghambatan pertumbuhan sianobakteri (Flores *et al.*, 2021). Metode bioaugmentasi juga dapat digunakan sebagai pendekatan yang efektif dalam pembersihan biologis limbah industri (Kaida *et al.*, 2021).

Biodegradasi LAS

Biodegradasi merupakan salah satu metode yang digunakan dalam mengurangi lingkungan yang tercemar dengan menggunakan aktivitas metabolisme organisme untuk mengoksidasi suatu senyawa organik dalam lingkungan tersebut. Metode ini dapat digunakan sebagai solusi yang efektif untuk pengolahan limbah industri yang berbahaya dengan biaya yang murah serta ramah lingkungan. Namun dalam proses biodegradasi, aktivitas mikroorganisme sebagai biokatalis memainkan peran penting, dan terkadang sifat intrinsik beberapa substrat menimbulkan tantangan serius dalam proses pengolahan. Hal ini dapat terjadi selama biodegradasi LAS. Sifat keras dari senyawa sulfonaromatik menimbulkan kendala dalam pembuangan senyawa ini ke dalam sistem



pengumpulan air limbah, karena kemampuan aktif permukaan surfaktan dapat berdampak negatif pada keutuhan membran sel mikroorganisme dan dapat menyebabkan denaturasi protein membran. Reaksi enzimatik dari kelompok bakteri yang berbeda terjadi pada waktu yang bersamaan. Untuk mengurangi kandungan LAS, mikroba akan menguraikannya dengan sangat lambat di alam. LAS berfungsi sebagai sumber karbon yang dimetabolisme oleh mikroorganisme untuk dijadikan sebagai sumber energi, sementara pada saat bersamaan, LAS mengalami degradasi atau pemecahan (Askari *et al.*, 2021).

Mekanisme Biodegradasi LAS oleh Bakteri

Langkah pertama dalam jalur biodegradasi LAS melibatkan produksi oksigen di ujung paling akhir rantai alkil, diikuti dengan pemendekan rantai alkil (oksidasi- β), dan pemecahan cincin aromatik (desulfonasi). Sulfofenil karboksilat merupakan perantara dalam rute ini. Kecepatan dan tingkat degradasi molar LAS secara individu bergantung pada panjang rantai alkil dan komposisi sulfofenil dalam molar. Untuk LAS dengan rantai alkil terpanjang dan juga untuk isomer LAS yang memiliki rantai alkil di tengah, laju degradasinya lebih cepat. Gugus sulfofenil dalam struktur LAS umumnya mengalami degradasi yang lebih lambat. Penurunan panjang rantai alkil dan kemampuan terbatas untuk memecah cincin aromatik sulfon pada LAS biasanya hanya terjadi pada strain bakteri tertentu. Biodegradasi LAS lebih optimal pada kondisi aerobik dibandingkan dalam kondisi anaerobik (Flores *et al.*, 2021). Biodegradasi LAS dapat dibagi menjadi 2 yaitu:

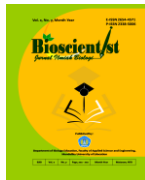
Degradasi Aerobik

Dalam biodegradasi aerobik LAS, rantai alkil molekul dianggap sebagai sumber karbon dan energi yang dapat dimanfaatkan untuk pertumbuhan mikroorganisme yang terlibat. Biodegradasi aerobik LAS dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu degradasi primer dan degradasi akhir. Pada tahap degradasi primer, molekul utama LAS mengalami pemecahan dan aktivitas antarmuka berkurang. Langkah ini diawali dengan aksi enzim alkilsulfatase yang sangat penting dalam mencapai mineralisasi LAS. Studi penelitian telah mengungkapkan bahwa degradasi primer terjadi di tahap awal dari jalur metabolisme. Selama tahap degradasi awal, mikroorganisme menghasilkan senyawa homolog rantai pendek yang disebut sulfofenil karboksilat (SPC) (Takada & Oya, 2022).

Proses utama dalam degradasi LAS adalah memecah cincin aromatik dan mengubahnya menjadi air, CO₂, sulfat anorganik, dan biomassa. Proses degradasi LAS melibatkan tindakan bertahap oleh tiga tingkat organisme. Organisme tingkat pertama memiliki enzim yang mampu mengoksidasi bagian ω dan β dari rantai alkil LAS. Organisme tingkat kedua mengubah SPC rantai panjang (lc-SPCs) yang dihasilkan melalui oksidasi β lebih lanjut dari rantai alkil menjadi SPC rantai pendek (sc-SPCs). Organisme tingkat ketiga melakukan mineralisasi sc-SPC melalui pembelahan 4-sulfocatechol dan cincin orto. Tahap pembukaan cincin aromatik ini merupakan tahap penentu laju dalam proses degradasi akhir LAS (Takada & Oya, 2022).

Degradasi Anaerobik

Dalam kondisi anaerobik, LAS mulai terurai menjadi asam sulfofenil karboksilat (SPC) sebagai produk degradasi utama ketika fumarat ditambahkan ke



rantai LAS. Setelah itu, asam dikarboksilat (Me-SPdC) dibentuk dengan menambahkan fumarat pada karbon sub-terminal (C-2) rantai alkil LAS. Reaksi selanjutnya menghasilkan Me-SPC yang mengalami oksidasi β tanpa adanya O_2 untuk menghasilkan SPC dan homolog 2-metilasi. Degradasi LAS yang terdiri dari jumlah atom C genap membentuk produk degradasi dengan jumlah atom karbon ganjil. Pada saat yang sama, SPC akan memiliki jumlah atom C yang sesuai. Terakhir, 1-Sulfofenil-Etanol (SPeT) terbentuk pada jalur degradasi setelah memanfaatkan rantai alkil, diikuti dengan desulfonasi dan pembelahan cincin pada tahap degradasi selanjutnya (Arora *et al.*, 2023). Biodegradasi LAS secara anaerobik sepenuhnya bergantung pada akseptor alternatif, seperti sulfat, nitrat, dan karbonat yang ada di lingkungan yang pada akhirnya menghasilkan H_2S , N_2 , CH_4 , dan NH_3 (Askari *et al.*, 2021).

Potensi Bakteri Endofit sebagai Agen Biodegradasi

Bakteri endofit tanaman telah mendapat banyak perhatian karena kemampuannya meningkatkan respon tanaman terhadap berbagai stresor. Banyak bakteri endofit telah diisolasi dari tanaman yang berbeda dan banyak di antaranya menunjukkan aktivitas pendegradasi polutan, serta meningkatkan pertumbuhan tanaman. Interaksi tumbuhan mikroba ditandai dengan sekresi protein dan pengikatan peptida. Perpindahan protein efektor membantu bakteri dalam mempertahankan gaya hidup parasitnya dengan mengurangi pertahanan inang, namun inang menstimulasi respons imun yang dipicu oleh efektor setiap kali ia mendeteksi protein efektor. Endofit mungkin mempunyai efek menguntungkan pada tanaman inang melalui berbagai mekanisme, termasuk meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui penekanan organisme penyebab penyakit tanaman, meningkatnya persaingan untuk mendapatkan ruang, nutrisi dan relung ekologi, memproduksi zat antimikroba, dan memproduksi biostimulan, seperti fitohormon dan peptida yang tidak menimbulkan dampak negatif terhadap pengguna, konsumen, dan lingkungan (Tian *et al.*, 2017).

Bakteri endofit juga memainkan peran penting selama pertumbuhan tanaman di lingkungan yang tercemar dengan meningkatkan aktivitas pemacu pertumbuhan tanaman, seperti fiksasi nitrogen, produksi siderofor, dan pelarutan fosfor. Selain itu, bakteri endofit dapat melindungi tanaman terhadap efek penghambatan polutan konsentrasi tinggi dan dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres (Shehzadi *et al.*, 2016). Bakteri endofit yang mensintesis aktivitas hormonal yang berbeda, seperti 1-Aminosiklopropana-1-Karboksilat (ACC), siderofor, Asam Indol Asetat (IAA), dan deaminase dapat mempercepat perkembangan tanaman dan menurunkan konsentrasi etilen dalam tanaman (Sharma & Kumar, 2021). Tingginya produksi IAA oleh bakteri endofit berperan penting dalam pertumbuhan tanaman yang juga berpotensi meningkatkan serapan dan akumulasi logam lebih tinggi (Afzal *et al.*, 2014). Jumlah bakteri endofit yang terdapat di sekitar permukaan akar dapat meningkat, dikarenakan eksudat yang dikeluarkan tanaman menyebabkan terbentuknya lingkungan yang ideal bagi pertumbuhan bakteri. Hal tersebut kemudian dapat memicu biodegradasi senyawa organik. Proses ini secara signifikan dapat meningkatkan populasi bakteri endofit dan aktivitas mikroba yang kemudian meningkatkan laju biodegradasi (Al-Ajalin

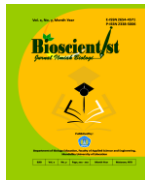


et al., 2022). Berikut merupakan tabel mengenai potensi dan kemampuan berbagai jenis bakteri endofit dalam mendegradasi beberapa jenis polutan.

Tabel 1. Kemampuan Bakteri Endofit dalam Mendegradasi Berbagai Jenis Polutan.

No.	Jenis Bakteri Endofit	Jenis Polutan	Persentase Degradasi	Sumber Penelitian
1	<i>Paenibacillus</i> sp.	Logam berat (As, Cu, Zn, dan Pb)	As 27.4%; Cu 59.4%; Zn 51.4%; Pb, 29.5%;	Govarthanan <i>et al.</i> , 2016
2	<i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Sphingobium</i> sp.	Nikel (Ni)	13.8% 15.3% 33.7%	Chen <i>et al.</i> , 2020
3	<i>Achromobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Alcaligenes</i> sp.	Benzene dan fenol	Benzene: 80%, 72%, dan 68% Fenol: 81%, 72%, dan 69%	Iqbal <i>et al.</i> , 2017
4	<i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.	Phenanthrene (PHE)	90%	Zhu <i>et al.</i> , 2016
5	<i>Pseudomonas</i> sp.	Solar	59.65%	Zhang <i>et al.</i> , 2014
6	<i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Bacillus cereus</i>	Amonium, fosfat, dan COD	75.8%, 58.3%, dan 90.8%	Al-Ajalin <i>et al.</i> , 2022
7	<i>Bacillus pumilus</i>	Hidrokarbon	90%	Mikolajczyk <i>et al.</i> , 2018
8	<i>Exiguobacterium profundum</i>	Limbah pewarna tekstil Reactive Black-5	84.78%	Shilpa & Shikha, 2015
9	<i>Bacillus megaterium</i>	Herbisida quinclorac	93%	Liu <i>et al.</i> , 2014
10	<i>Burkholderia cenocapacia</i>	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD)	95%	Nguyen <i>et al.</i> , 2021

Pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa beberapa spesies bakteri endofit yang diisolasi dari berbagai jenis tanaman berpotensi dalam mendegradasi polutan, seperti logam berat, benzene, fenol, phenanthrene (PHE), solar, ammonium, fosfat, COD, dan hidrokarbon. Beberapa spesies bakteri endofit yang berpotensi sebagai agen degradasi polutan tersebut di antaranya adalah *Pseudomonas* sp., *Paenibacillus* sp., *Stenotrophomonas* sp., *Sphingobium* sp., *Achromobacter* sp., *Alcaligenes* sp., *Enterobacter cloacae*, *Bacillus cereus*, dan *Bacillus pumilus*. Mikroba tersebut diketahui memiliki jalur metabolisme yang beragam untuk memanfaatkan polutan organik sebagai sumber karbon tunggal, namun lebih sering dan efisien dalam melakukan ko-metabolisme. Dampak dari proses ini memungkinkan mikroba untuk melakukan mineralisasi atau mengubah kontaminan menjadi derivat yang tidak bersifat toksik (Karaś *et al.*, 2021). Bakteri dari genus *Pseudomonas* merupakan mikroorganisme yang efektif menguraikan polutan organik melalui ko-metabolisme di lingkungan alami air dan tanah. Salah satu aktivitas enzimatik bakteri adalah *Enzyme-catalysed transformation* yang dimanfaatkan oleh bakteri untuk menggunakan atau mentransformasikan senyawa polutan sebagai sumber energi dan karbonnya (Nurmalasari *et al.*, 2020).



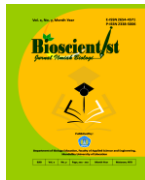
Keunggulan dari bakteri endofit adalah ketika diperlukan rekayasa genetika pada jalur degradasi xenobiotik, bakteri lebih mudah untuk dimanipulasi dari pada tanaman. Selain itu, ekspresi kuantitatif gen-gen katabolik polutan dalam populasi endofit dapat digunakan untuk menilai efisiensi proses degradasi. Dalam hal degradasi senyawa xenobiotik, bakteri endofit mungkin memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bakteri rhizosfer. Bakteri tersebut efisien dalam mengkolonisasi bagian rizosfer dan juga endosfer serta mampu mendegradasi kontaminan pada kedua lingkungan tersebut. Di dalam tanaman, bakteri tersebut bahkan mungkin berinteraksi dengan tanaman dan mendegradasi kontaminan secara sinergis. Melalui degradasi rhizosfer dan endofit, bakteri ini juga cenderung melakukan detoksifikasi lingkungan tanaman dengan lebih efisien (Afzal *et al.*, 2014).

Bakteri Pendegradasi LAS

Salah satu metode penghilangan LAS yang paling sering terjadi dari lingkungan yang tercemar adalah biodegradasi mikroba. Pada proses tersebut, terdapat reaksi enzimatik dari kelompok bakteri berbeda yang terjadi pada waktu bersamaan. Penelitian menggunakan inokulum mikroalga *Scenedesmus dimorphus* dan bakteri *Plesiomonas* sp., dan *Pseudomonas* sp., dalam proses degradasi LAS menunjukkan bahwa inokulasi mikroalga bakteri berpengaruh dalam mendegradasi LAS dengan tingkat penyisihan rata-rata adalah 94,6% dibandingkan dengan perlakuan tanpa inokulasi, yaitu konsentrasi LAS menurun sebesar 81,7% (Tu *et al.*, 2020).

Pada penelitian lain yang menggunakan bakteri *Klebsiella* sp., dan *Enterobacter* sp., menunjukkan bahwa laju degradasi LAS 50 mg/L dengan penambahan glukosa sebanyak 500 mg/L mencapai 94,2%, sedangkan laju degradasi LAS (50 mg/L) dengan konsentrasi glukosa 1000 mg/L mencapai 92,2% (Ran *et al.*, 2016). Bakteri *Bacillus cereus* juga diketahui dapat mendegradasi LAS dalam waktu inkubasi selama 2 minggu pada suhu ruang. Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri *Bacillus cereus* dapat memproduksi enzim yang digunakan dalam mekanisme degradasi LAS (Putra *et al.*, 2018).

Berdasarkan Tabel 1, bakteri endofit telah diketahui kemampuannya dalam mendegradasi berbagai zat pencemar pada lingkungan. Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri endofit juga berpotensi mampu mendegradasi LAS, karena bakteri endofit yang memanfaatkan jalur metabolisme yang tepat memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi dalam proses degradasi senyawa organik. Namun, kemampuannya dalam mendegradasi LAS masih belum diketahui, dan penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi potensinya dalam biodegradasi LAS. Hasil penelusuran tidak memberikan informasi spesifik mengenai kemampuan bakteri endofit dalam mendegradasi LAS, namun hasil pencarian menunjukkan bahwa bakteri endofit dapat digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan dan kesehatan tanaman, mengendalikan penyakit tanaman, dan memulihkan *greywater* menggunakan pengolahan lahan basah terapung. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui potensi dan kemampuan bakteri endofit dalam mendegradasi LAS, serta untuk mengembangkan strategi bioremediasi yang lebih efektif dan berkelanjutan.



SIMPULAN

Berdasarkan hasil *review* jurnal yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa bakteri endofit diketahui memiliki kemampuan dalam mendegradasi berbagai jenis polutan, seperti logam berat, benzene, fenol, phenanthrene (PHE), solar, ammonium, fosfat, COD, dan hidrokarbon. Hal tersebut menunjukkan bahwa bakteri endofit juga berpotensi mampu mendegradasi LAS, karena bakteri endofit yang memanfaatkan jalur metabolisme yang tepat memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi dalam proses degradasi senyawa organik. Namun, penelitian mengenai kemampuan bakteri endofit dalam mendegradasi LAS masih terbatas, karena belum terdapat penelitian yang spesifik menggunakan bakteri endofit sebagai agen biodegradasi LAS, sehingga penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi potensi dan kemampuannya dalam mendegradasi LAS.

SARAN

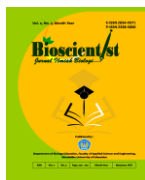
Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengetahui potensi dan kemampuan bakteri endofit dalam mendegradasi LAS, serta untuk mengembangkan strategi bioremediasi yang lebih efektif dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

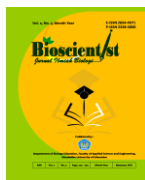
Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tulisan ini.

DAFTAR RUJUKAN

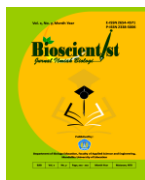
- Afzal, M., Khan, Q. M., & Sessitsch, A. (2014). Endophytic Bacteria: Prospects and Applications for the Phytoremediation of Organic Pollutants. *Chemosphere*, 117(1), 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.078>
- Al-Ajalín, F. A. H., Abdullah, S. R. S., Idris, M., Kurniawan, S. B., Ramli, N. N., & Imron, M. F. (2022). Removal of Ammonium, Phosphate, and COD by Bacteria Isolated from *Lepironia articulata* and *Scirpus grossus* Root System. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(1), 11893-11904. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03926-1>
- Arora, U., Khuntia, H. K., Chanakya, H. N., & Kapley, A. (2023). Surfactants: Combating the Fate, Impact, and Aftermath of their Release in the Environment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 11551-11574. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04549-2>
- Askari, A., Vahabzadeh, F., & Mahdi, M. (2021). The Identification and Performance Assessment of Dominant Bacterial Species During Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)-Biodegradation in a Bioelectrochemical System. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(12), 2579-2590. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02629-0>
- Belanger, S. E., Brill, J. L., Rawlings, J. M., & Price, B. B. (2016). Development of Acute Toxicity Quantitative Structure Activity Relationships (QSAR) and their Use in Linear Alkylbenzene Sulfonate Species Sensitivity



- Distributions. *Chemosphere*, 155(1), 18-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.029>
- Bradai, M., Han, J., Omri, A. E., Funamizu, N., Sayadi, S., & Isoda, H. (2016). Effect of Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) on Human Intestinal Caco-2 Cells at Non Cytotoxic Concentrations. *Cytotechnology*, 68(4), 1267-1275. <https://doi.org/10.1007/s10616-015-9887-4>
- Chen, J., Li, N., Han, S., Sun, Y., Wang, L., Qu, Z., Dai, M., & Zhao, G. (2020). Characterization and Bioremediation Potential of Nickel-Resistant Endophytic Bacteria Isolated from the Wetland Plant *Tamarix chinensis*. *FEMS Microbiology Letters*, 367(12), 1-7. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnaa098>
- Flores, G. P., Brito, R. S., Cervantes, V. M., Altamirano, R. H., & Solares, M. G. (2021). Biodegradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate-Anthracene Mixture by a Microbial Consortium Isolated from Sediment. *Research Journal of Biotechnology*, 16(12), 1-9. <https://doi.org/10.25303/1612rjbt001009>
- Gouda, A. M. R., Hagra, A. E., Okbah, M. A., & El-Gammal, M. I. (2022). Influence of the Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) on Hematological and Biochemical Parameters of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2), 1006-1013. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.074>
- Govarthanan, M., Mythili, R., Selvankumar, T., Kannan, S. K., Rajasekar, A., & Chang, Y. C. (2016). Bioremediation of Heavy Metals Using an Endophytic Bacterium *Paenibacillus* Sp. RM Isolated from the Roots of *Tridax procumbens*. *3 Biotech*, 6(2), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0560-1>
- Indah, D. R., & Safnowandi, S. (2020). Karakterisasi Karbon Baggase Teraktivasi dan Aplikasinya untuk Adsorpsi Logam Tembaga. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 7(2), 46-54. <https://doi.org/10.33394/hjkk.v7i2.1912>
- Iqbal, A., Arshad, M., Hashmi, I., Karthikeyan, R., Gentry, T. J., & Schwab, A. P. (2017). Biodegradation of Phenol and Benzene by Endophytic Bacterial Strains Isolated from Refinery Wastewater-Fed *Cannabis sativa*. *Environmental Technology*, 39(13), 1705-1714. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1337232>
- Kaida, H., Syed, M. A., Shukor, M. Y., & Othman, A. R. (2021). Biodegradation of Linear Alkylbenzene Sulfonates (LAS): A Mini Review. *Bioremediation Science and Technology Research*, 9(1), 1-6. <https://doi.org/10.54987/bstr.v9i1.590>
- Karaś, M. A., Wróbel, S. W., & Sokołowski, W. (2021). Selection of Endophytic Strains for Enhanced Bacteria-Assisted Phytoremediation of Organic Pollutants Posing a Public Health Hazard. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17), 1-23. <https://doi.org/10.3390/ijms22179557>
- Liu, M., Luo, K., Wang, Y., Zeng, A., Zhou, X., Luo, F., & Bai, L. (2014). Isolation, Identification and Characteristics of an Endophytic Quinlorac Degrading Bacterium *Bacillus megaterium* Q3. *PLoS ONE*, 9(9), 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108012>



- Luo, Y., Jin, X., Xie, H., Ji, X., Liu, Y., Guo, C., Giesy, J. P., & Xu, J. (2023). Linear Alkylbenzene Sulfonate Threats to Surface Waters at the National Scale: A Neglected Traditional Pollutant. *Journal of Environmental Management*, 342(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118344>
- Mikolajczyk, O. M., Drozdzyński, P., Pietrzyk, D., & Antczak, T. (2018). Biosurfactant Production and Hydrocarbon Degradation Activity of Endophytic Bacteria Isolated from *Chelidonium majus* L. 06 Biological Sciences 0605 Microbiology 06 Biological Sciences 0607 Plant Biology 09 Engineering 0907 Environmental Engineering. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1017-5>
- Nguyen, B. A. T., Hsieh, J. L., Lo, S. C., Wang, S. Y., Hung, C. H., Huang, E., Hung, S. H., Chin, W. C., & Huang, C. C. (2021). Biodegradation of Dioxins by Burkholderia Cenocepacia Strain 869T2: Role of 2-Haloacid Dehalogenase. *Journal of Hazardous Materials*, 401(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123347>
- Nurmalasari, A., Oedjijono., & Lestari, S. (2020). Isolasi dan Uji Resistensi Bakteri Endofit Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* Mart.) terhadap Krom secara In-Vitro. *Jurnal Ilmiah Biologi Unsoed*, 2(2), 266-272.
- Ogawa, T., & Kawase, Y. (2021). Effect of Solution pH on Removal of Anionic Surfactant Sodium Dodecylbenzenesulfonate (SDBS) from Model Wastewater Using Nanoscale Zero-Valent Iron (NZVI). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105928>
- Osadebe, A., Azuka, C., Mere, O., & Okpokwasili, G. (2018). Microbial Degradation of Anionic Surfactants from Laundry Detergents Commonly Discharged into a Riverine Ecosystem Microbial Degradation of Anionic Surfactants from Laundry Detergents Commonly Discharged into a Riverine Ecosystem. *Journal of Applied Life Sciences International*, 16(4), 1-11. <https://doi.org/10.9734/JALSI/2018/40131>
- Putra, I. G. P. A. F. S., Juliantara, I. K. P., & Setiawati, N. P. D. (2018). Uji Potensi Bakteri *Bacillus cereus* dalam Menurunkan Kadar Linier Alkil Sulfonat. *Jurnal Media Sains*, 2(2), 71-75.
- Ran, Z. L., Zhu, J., Zhou, L., & Ji, R. W. (2016). Study on Degradation Kinetics of Co-Metabolic Biodegradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate Strains. In *Proceedings of the 2016 International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development* (pp. 1071-1074). Shenzhen, China: Atlantis Press.
- Rizky, N. A., Irawati, U., & Rohman, T. (2020). Degradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) Using TiO 2-Chitosan Composite as a Photocatalyst Degradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) Using TiO 2-Chitosan Composite as a Photocatalyst. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 980(1), 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/980/1/012075>
- Sharma, P., & Kumar, S. (2021). Bioremediation of Heavy Metals from Industrial Effluents by Endophytes and Their Metabolic Activity: Recent Advances.



-
- Bioresource Technology, 339(1), 1-20.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125589>
- Shehzadi, M., Fatima, K., Imran, A., Mirza, M. S., Khan, Q. M., & Afzal, M. (2016). Ecology of Bacterial Endophytes Associated with Wetland Plants Growing in Textile Effluent for Pollutant-Degradation and Plant Growth-Promotion Potentials. *Plant Biosystems*, 150(6), 1261-1270.
<https://doi.org/10.1080/11263504.2015.1022238>
- Shilpa, S., & Shikha, R. (2015). Biodegradation of Dye Reactive Black - 5 by a Novel Bacterial Endophyte. *International Research Journal of Environment Sciences*, 4(4), 44-53.
- Siyal, A. A., Shamsuddin, M. R., Low, A., & Rabat, N. E. (2020). A Review on Recent Developments in the Adsorption of Surfactants from Wastewater. *Journal of Environmental Management*, 254(1), 1-20.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109797>
- Takada, N., & Oya, M. (2022). Classification of the Biodegradation Factors of Linear Alkylbenzene Sulfonate. *Journal of Oleo Science*, 1318(9), 1309-1318. <https://doi.org/10.5650/jos.ess21440>
- Tian, B., Zhang, C., Ye, Y., Wen, J., Wu, Y., Wang, H., Li, H., Cai, S., Cai, W., Cheng, Z., Lei, S., Ma, R., Lu, C., Cao, Y., Xu, X., & Zhang, K. (2017). Beneficial Traits of Bacterial Endophytes Belonging to the Core Communities of the Tomato Root Microbiome. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247(2), 149-156.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.041>
- Tu, R., Jin, W., Han, S. F., Ding, B., Gao, S., Zhou, X., Li, S., Feng, X., Wang, Q., Yang, Q., & Yuwen, Y. (2020). Treatment of Wastewater Containing Linear Alkylbenzene Sulfonate by Bacterial-Microalgal Biological Turntable. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37(5), 827-834.
<https://doi.org/10.1007/s11814-020-0499-0>
- Zhang, X., Liu, X., Wang, Q., Chen, X., Li, H., Wei, J., & Xu, G. (2014). Diesel Degradation Potential of Endophytic Bacteria Isolated from *Scirpus triqueter*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 87(1), 99-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.007>
- Zhu, X., Ni, X., Waigi, M. G., Liu, J., Sun, K., & Gao, Y. (2016). Biodegradation of Mixed PAHs by PAH-Degrading Endophytic Bacteria. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8), 1-13.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13080805>