



Bioremediasi Cemaran Tanah Menggunakan Biostimulant

Bioremediation of Soil Contamination Using Biostimulants

Aisha Bella Calvina¹, Alma Dita Ardiana¹, Chofifatus Solecha Azzahra¹, Nadya Rachmania Santosa¹, Nanda Fadlilatul Miladya¹, Nazwa Zahira Anwar¹, Isnaeni^{2*}

¹Fakultas Farmasi, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia

²Program Studi S1 Farmasi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Indonesia

*Corresponding author : isnaeni@um-surabaya.ac.id

INFO ARTIKEL

Dikirim:
28 November 2024

Direvisi:
26 Desember 2024

Diterima:
29 Desember 2024

Terbit Online:
31 Desember 2024

ABSTRAK

Semakin meningkatnya perhatian dalam bioremediasi adalah penggunaan biostimulan yang dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme dalam tanah dan mempercepat proses degradasi kontaminan. Bioremediasi adalah proses biologis yang melibatkan penggunaan mikroorganisme, tanaman, atau enzim untuk mendekomposisi, menetralkan, atau menghilangkan kontaminan dari lingkungan tercemar, terutama dari tanah, air, dan udara. Bioremediasi secara *in-situ* adalah biodegradasi oleh mikroba pada kontaminasi dalam matriks tanah bawah permukaan dan dapat diolah di lokasi terjadinya cemaran. Bioremediasi secara *ex-situ* memerlukan penggalian tanah yang terkontaminasi dan dilakukan di luar lokasi terjadinya cemaran. Teknik *ex-situ* tidak digunakan pada tanah yang berada di pusat kota ataupun di bawah bangunan, karena membutuhkan ruang penggalian yang cukup besar. Cemaran tanah dapat didefinisikan sebagai suatu zat dalam tanah pada konsentrasi yang lebih tinggi dari biasanya oleh bahan limbah yang memiliki dampak merugikan kesehatan manusia dan ekosistem. Bahan limbah umumnya dibuang ke perairan sebagai cairan, di mana sebagian dapat larut, sementara yang lainnya dapat mengendap di permukaan tanah, kemudian meresap ke dalam dan mencemari tanah. Cemaran kemudian dapat bergerak lebih dalam ke lapisan tanah melalui proses perkolasi, yang bergerak dari lokasi dengan konsentrasi tinggi ke konsentrasi lebih rendah. Pergerakan cemaran melalui perkolasi dapat menyebabkan pencemaran air tanah, yang merupakan sumber vital bagi banyak ekosistem dan pemukiman manusia. Biostimulan Organic Waste (BOW) berbahan baku sampah organik pasar memiliki nilai unsur-unsur C-organik, N, P dan K yang tinggi. Nilai unsur-unsur telah memenuhi persyaratan teknis minimal pupuk cair organik dan pembenah tanah.

Kata kunci: Bioremediasi, Biostimulan, Cemaran tanah

ABSTRACT

Increasing attention in the context of bioremediation is the use of biostimulants that can promote the activity of microorganisms in the soil and accelerate the contaminant degradation process. Bioremediation is a biological process that involves the use of microorganisms, plants, or enzymes to decompose, neutralize, or remove contaminants from a polluted environment, especially from soil, water, and air. In situ bioremediation is microbial biodegradation of contamination in the subsurface soil matrix and can be processed at the location where the contamination occurred. Ex-situ bioremediation requires excavation of contaminated soil and is carried out outside the location where the contamination occurred. The ex-situ technique cannot be used on land located in the city center or under buildings, because it requires quite a large excavation space. Soil pollution can be defined as a substance present in the soil at a higher than normal concentration by waste materials that has a negative impact on human health and the ecosystem. Waste materials are generally discharged into waters as liquids, where some can dissolve, while others can settle on the surface of the soil and then seep into the soil and pollute the soil. Contaminants can then move deeper into the soil layers through the percolation process, which moves from areas of high to lower concentration. The movement of contaminants through percolation cause groundwater pollution, which is a vital resource for many ecosystems and human settlements. Biostimulant Organic Waste (BOW) made from market organic waste has a high value (12) of C-organic, N, P and K elements. The value of BOW elements has met the minimum Technical Requirements for organic liquid fertilizer and soil improver.

Keywords: *Bioremediation, Biostimulant, Soil contamination*

PENDAHULUAN

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2021, provinsi Jawa Timur mengalami pencemaran tanah di 154 desa atau kelurahan, sehingga menjadikan provinsi dengan tingkat pencemaran tanah tertinggi setelah provinsi Jawa Tengah. Pencemaran tanah adalah keberadaan suatu zat atau cemaran di dalam tanah yang dapat merubah lingkungan tanah. Keberadaan cemaran di dalam tanah telah diakui menjadi permasalahan global yang berdampak signifikan terhadap kesehatan dan produktivitas ekosistem. Secara keseluruhan, cemaran tanah akan menyebabkan ketersediaan sumber daya lahan yang dapat ditanami menjadi berkurang, hasil panen menurun, kontaminasi produk pertanian, dan dampak negatif pada keamanan pangan dan kesehatan manusia, yang pada akhirnya akan berdampak pada keberlanjutan sosial dan ekonomi (Xin *et al.*, 2022).

Cemaran tanah umumnya disebabkan oleh senyawa organik maupun anorganik yang sebagian besar berasal dari aktivitas industri dan pertanian (Havugimana *et al.*, 2017). Aktivitas industri farmasi akan menghasilkan sejumlah

besar produk sampingan berupa air limbah yang mengandung bahan kimia aktif, pelarut berbahaya, dan juga logam berat yang dapat berasal dari bahan baku, proses produksi, atau pengemasan. Karena kompleksitasnya dalam lingkungan tanah, banyak di antara cemaran tersebut akan sulit dihilangkan atau didegradasi dengan mudah (Li *et al.*, 2022). Untuk menjaga keberlanjutan penggunaan lahan tanah, pengembangan teknologi baru terus dilakukan untuk tujuan remediasi tanah dalam mencegah terjadinya kerusakan (Gao *et al.*, 2022). Perkembangan dua dekade terakhir, menunjukkan bahwa teknik bioremediasi secara efektif dapat memulihkan lingkungan yang tercemar. Fenomena ini disebabkan oleh banyaknya manfaat yang ditawarkan oleh teknik bioremediasi, termasuk menggunakan pendekatan ramah lingkungan dan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan metode remediasi lain (Azubuike *et al.*, 2016).

Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian dalam konteks bioremediasi adalah pengembangan biostimulan yang dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme di dalam tanah, sehingga mempercepat proses degradasi kontaminan. Berbeda dengan bioaugmentasi

yang menambahkan mikroba eksogenus untuk meningkatkan jumlah koloni mikroba sesuai persyaratan, yaitu 10^{-3} /gram tanah (KLHK, 2015), biodegradasi metode biostimulan menggunakan nutrisi eksogenus seperti pupuk hayati, pupuk NPK dan bahan organik lain untuk meningkatkan populasi mikroba yang memiliki kemampuan untuk mengurai senyawa berbahaya apabila tidak diatasi. Shofiandi & Naniek (2021) melaporkan bahwa penambahan pupuk NPK dan kompos masing-masing dapat menurunkan konsentrasi cemaran senyawa hidrokarbon dalam tanah sebesar 64% dan 32%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biostimulan tidak hanya meningkatkan degradasi kontaminan, tetapi juga dapat memperbaiki struktur dan kesuburan tanah (Bartucca *et al.*, 2022).

Inovasi ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan remediasi cara lain, misalnya insenerasi, *in-situ* dan *ex-situ*. Sifatnya yang ramah lingkungan dan aman, karena biostimulan menggunakan bahan nutrisi yang sederhana dan aman, mikroba yang distimulai juga aman, karena secara alami mikroba tersebut sudah berada di dalam tanah, tinggal ditambahkan nutrisi untuk meningkatkan efektivitas daya degradasinya. Dengan memperbaiki kualitas tanah, biostimulan juga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik dan meningkatkan hasil pertanian, sehingga berkontribusi pada ketahanan pangan. Melalui penerapan biostimulan, industri farmasi dan sektor lainnya dapat lebih bertanggung jawab dalam pengelolaan limbah, serta berperan aktif dalam pemulihan ekosistem yang terdampak oleh pencemaran. Dengan demikian, kombinasi antara teknik bioremediasi dan penggunaan biostimulan menjadi solusi yang berpotensi besar untuk mengatasi masalah pencemaran tanah yang semakin mendesak.

METODE PENELITIAN

Artikel ini disusun berdasarkan hasil *review* beberapa artikel *review* dan artikel ilmiah yang terbit di jurnal nasional maupun internasional sebagai sumber data. Dari PubChem dan Google Scholar dilakukan *tracer* data di jurnal menggunakan kata kunci "Bioremediasi", "biostimulan", "biodegradasi", dan "limbah tanah" dengan tahun terbit jurnal 2012-2024. Hasil *tracer* artikel *review* dan artikel hasil penelitian disusun secara komprehensif untuk ditelaah dan dilakukan kajian sesuai pokok bahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioremediasi

Bioremediasi merupakan salah satu pendekatan yang semakin banyak digunakan dalam menangani permasalahan pencemaran lingkungan. Teknik ini menggunakan mikroorganisme, tanaman, atau enzim untuk menguraikan dan menetralkan polutan berbahaya dari lingkungan, terutama dari tanah dan air. Sebagai metode ramah lingkungan, bioremediasi menawarkan solusi yang lebih aman dibandingkan metode fisik dan kimia tradisional yang seringkali mahal dan berisiko tidak ramah lingkungan. Bioremediasi termasuk proses biologis yang melibatkan penggunaan mikroorganisme (seperti bakteri dan jamur), tanaman, atau enzim untuk mendekomposisi, menetralkan dan/atau menghilangkan kontaminan dari lingkungan yang tercemar, terutama dari tanah, air, dan udara. Teknik ini dianggap sebagai salah satu solusi ramah lingkungan untuk menangani polutan, karena mampu meminimalkan risiko bagi ekosistem (Kumari *et al.*, 2021).

Menurut Thapa *et al.* (2012), bioremediasi merupakan teknologi ramah lingkungan dan hemat biaya yang memanfaatkan agen biologis, terutama mikroorganisme, untuk mendegradasi, mentransformasi, atau mendetoksifikasi polutan di lingkungan menjadi bentuk yang kurang toksik atau tidak beracun. Dalam dekade terakhir, pendekatan ini telah menarik perhatian besar karena potensinya yang luas dalam mengatasi berbagai jenis kontaminan, seperti senyawa organik, logam berat, dan hidrokarbon.

Macam-Macam Bioremediasi

Bioremediasi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu bioremediasi secara *in-situ* dan *ex-situ*. Pemilihan bioremediasi tergantung pada beberapa faktor seperti, biaya, lokasi, kedalaman polutan, jenis polutan dan konsentrasi polutan. Selain itu, konsentrasi oksigen, nutrisi, pH, suhu, dan faktor abiotik lainnya perlu diperhatikan sebelum memilih teknik bioremediasi.

Bioremediasi secara *in situ* adalah biodegradasi oleh mikroba pada kontaminasi di dalam matriks tanah bawah permukaan dan dapat diolah di lokasi terjadinya cemaran. Pada teknik bioremediasi ini tidak dilakukan penggalian tanah yang terkontaminasi, tetapi pada saat melakukan pemompaan air tanah atau aerasi vakum perlu dilakukan penggalian untuk mendistribusikan unsur-unsur, seperti nutrisi atau oksigen yang diperlukan untuk degradasi yang lebih baik (Brown *et al.*, 2017). Teknik ini

biasanya tidak memerlukan biaya yang besar dibandingkan teknik *ex-situ*, karena tidak memerlukan proses penggalian, meskipun terdapat beberapa peralatan canggih untuk meningkatkan aktivitas mikroba. Teknik bioremediasi *in-situ* telah berhasil digunakan untuk menangani pelarut teroksidasi, pewarna, logam berat, dan hidrokarbon di lokasi yang tercemar (Folch *et al.*, 2013; Franscari *et al.*, 2015; Roy *et al.*, 2015). Terdapat beberapa teknik dalam bioremediasi *in-situ*; yaitu *natural attenuation* (pemulihan secara alami) dan melalui peningkatan seperti, fitoremediasi, *bioventing*, bioaugmentasi, dan *biosparging*.

Perbaikan secara alami (*natural attenuation*) terkait dengan aktivitas degradasi oleh mikroorganisme *indigenous*. Pemulihan secara alami adalah opsi tanpa tindakan yang dapat menghilangkan polutan dan didegradasi dengan cara alami (Melati, 2020). Metode ini biasanya digunakan pada kondisi tumpahan minyak di lokasi terpencil atau di daerah sensitif dimana tindakan pembersihan dapat menyebabkan kerusakan yang lebih parah dibanding perbaikan. Perbaikan melalui peningkatan, antara lain dengan fitoremediasi.

Fitoremediasi bergantung pada penggunaan pemanfaatan tanaman di lokasi tercemar untuk mengurangi efek racun dari polutan. Polutan unsur logam berat beracun dan radionuklida sebagian besar dihilangkan dengan ekstraksi, transformasi, dan sekuestrasi. Polutan organik (hidrokarbon dan senyawa teroksidasi) sebagian besar dihilangkan dengan degradasi, rhizoremediasi, stabilisasi, dan volatilisasi (Azubuike *et al.*, 2016).

Bioventing adalah teknik yang melibatkan stimulasi aliran udara yang terkontrol dengan memberikan oksigen ke zona tak jenuh untuk meningkatkan bioremediasi, sehingga aktivitas mikroba dapat ditingkatkan (Azubuike *et al.*, 2016).

Bioaugmentasi dapat dilakukan jika populasi mikroba *indigenous* pendegradasi polutan di lokasi tersebut jumlahnya rendah, sehingga perlu penambahan mikroba ke lokasi yang tercemar. Penambahan mikroba berfungsi sebagai pembersih kontaminan di lokasi yang tercemar. Teknik bioaugmentasi dilaporkan telah berhasil menyisihkan berbagai jenis polutan seperti senyawa teroksidasi dan terfluorinasi, lignin, quinolin dan piridin, pewarna sintetik, sianida, nikotin, DGBE, PAHs (Melati, 2020).

Biosparging adalah teknik yang sangat mirip dengan *bioventing*, dilakukan penyuntikan udara ke dalam tanah untuk merangsang aktivitas mikroba. Udara disuntikkan pada zona

jenuh, menyebabkan pergerakan ke atas senyawa organik volatil ke zona tak jenuh untuk mendorong biodegradasi. *Biosparging* telah banyak digunakan dalam merawat akuifer yang terkontaminasi produk minyak bumi (Azubuike *et al.*, 2016).

Bioremediasi secara *ex-situ* memerlukan penggalian tanah yang terkontaminasi dan dilakukan di luar lokasi terjadinya cemaran. Oleh karena itu, kontaminasi pada permukaan tanah dapat dengan mudah diolah dengan teknik *ex-situ* (Brown *et al.*, 2017). Teknik *ex-situ* tidak dapat digunakan pada tanah yang berada di pusat kota ataupun di bawah bangunan, karena membutuhkan ruang penggalian yang cukup besar. Meskipun demikian, teknik *ex-situ* dapat digunakan untuk berbagai polutan dan lebih mudah untuk dikendalikan. Terdapat beberapa teknik dalam bioremediasi *ex-situ* yaitu bioreaktor, *landfarming*, dan *vermicomposting*.

Bioreaktor adalah teknik yang digunakan untuk mengolah limbah cair, uap, padat (dalam bentuk *slurry* atau lumpur). Mikroorganisme yang digunakan dalam teknik ini harus dapat hidup dengan atau tanpa tambahan oksigen atau akseptor elektron lainnya (nitrat, CO₂, sulfat, dan logam teroksidasi) dan nutrisi (nitrogen, fosfor, atau mineral tertentu) (Fidiastuti *et al.*, 2017). *Landfarming* adalah teknik yang biasanya digunakan untuk remediasi lokasi yang tercemar hidrokarbon termasuk hidrokarbon poliaromatik (Azubuike *et al.*, 2016). Ketersediaan air dan beberapa kontaminan yang perlu nitrogen atau fosfor harus diperhatikan pada teknik ini.

Vermicomposting adalah teknik yang menggunakan kombinasi tanah yang terkontaminasi dan tanah yang mengandung pupuk atau senyawa organik yang dapat meningkatkan jumlah atau populasi mikroorganisme. *Vermicomposting* dipengaruhi oleh biokimia dan aktivitas fisik cacing tanah. Banyak penelitian yang melaporkan kemampuan teknik *vermicomposting* dalam mendegradasi limbah padat organik khususnya PAHs dan logam berat (Silva *et al.*, 2019; Kamergam *et al.*, 2019; He *et al.*, 2016). Teknik ini penting untuk mengatasi cemaran lingkungan yang disebabkan oleh logam berat.

Biostimulan

Selain dibedakan berdasarkan tata letaknya, bioremediasi juga memiliki berbagai macam metode. Salah satunya yaitu biostimulan, suatu metode bioremediasi yang menggunakan mikroorganisme yang sudah ada dalam lokasi tersebut. Sebagai contoh jika ingin melakukan bioremediasi pada perairan, maka digunakan

mikroorganisme atau mikroba yang sudah ada di perairan tersebut. Sama halnya dengan bioremediasi pada cemaran tanah. Biostimulan yang sudah menggunakan mikroorganisme asal lokasi, tidak memerlukan penambahan mikroorganisme dari luar lokasi tersebut dan hanya dilakukan pemberian nutrisi untuk merangsang aktivasi mikroorganisme yang ada dalam tanah, misalnya Cyanobacteria dan Rhizobacteria. Dalam tanah, lebih banyak bakteri Gram-positif dibandingkan Gram-negatif (Briški *et al.*, 2017). Nutrisi yang dapat diberikan untuk merangsang aktivasi mikroorganisme dalam tanah antara lain nitrogen (N), fosfor (P), protein, garam anorganik, asam humat, dan lain-lain.

Unsur N dan P adalah makronutrien esensial yang memainkan peran penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Akan tetapi, terbatasnya ketersediaan fosfor di tanah menghadirkan tantangan signifikan bagi produktivitas tanaman, terutama ketika tanaman mengalami stres abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem (Khan *et al.*, 2023).

Berbeda jika dibandingkan bioremediasi metode bioaugmentasi yang menggunakan mikroorganisme tambahan untuk melakukan bioremediasi dalam lokasi tertentu. Biostimulan yang menggunakan mikroorganisme asal lokasi tidak memerlukan waktu untuk adaptasi mikroorganisme dan tidak ada risiko kegagalan akibat mikroorganisme yang tidak dapat beradaptasi pada lokasi tanah yang akan dilakukan bioremediasi. Dengan menggunakan mikroorganisme asal, metode ini tidak memerlukan biaya lebih untuk mikroorganisme itu sendiri dan hanya mengeluarkan biaya pada kebutuhan nutrisi dan penyesuaian sistem lingkungan. Biostimulan yang menggunakan mikroorganisme asal juga mengurangi intervensi lingkungan, karena tidak ada substansi baru yang ditambahkan. Kelebihan ini juga lebih cocok untuk area yang luas, karena hanya dilakukan pemberian nutrisi dan penyesuaian lingkungan. Penyesuaian lingkungan dari metode ini juga merupakan kelemahan karena sulit untuk memberikan kondisi suhu, pH dan kelembaban tanah yang sesuai. Salah satunya karena faktor iklim, terutama di negara dengan empat musim seperti Indonesia, karena suhu dan kelembaban tanah yang sering kali berubah.

Keberhasilan biostimulan dipengaruhi oleh kemampuan mikroorganisme asal dalam mendegradasi cemaran. Jika mikroorganisme asal memang kurang efektif dalam mendegradasi cemaran, maka sebanyak dan sebaik apapun nutrisi yang diberikan pada lingkungan tersebut tidak akan efektif. Kondisi ini

umumnya terjadi jika senyawa yang mencemari terlalu kompleks, sehingga memerlukan mikroorganisme yang sudah direkayasa atau ditingkatkan untuk dapat mendegradasi senyawa cemaran kompleks tersebut.

Dengan demikian, sebelum melakukan biostimulasi diperlukan analisis mikroorganisme meliputi jenis, jumlah, dan kemampuan mikroorganisme tersebut dalam mendegradasi cemaran yang berada pada lokasi yang akan dilakukan bioremediasi. Selain itu, juga diperlukan analisis lingkungan meliputi suhu, pH, dan kelembaban pada lokasi tersebut, untuk menentukan apakah biostimulan merupakan metode bioremediasi yang cocok digunakan untuk mendegradasi cemaran di wilayah perairan, industri, pertanian, dan lain sebagainya.

Cemaran Tanah

Cemaran tanah dapat didefinisikan sebagai suatu zat yang berada di dalam tanah pada konsentrasi yang lebih tinggi dari biasanya oleh bahan limbah yang memiliki dampak buruk pada kesehatan manusia dan ekosistem (Münzel *et al.*, 2023). Bahan limbah umumnya dibuang ke perairan sebagai cairan, sebagian dapat larut, sementara yang lainnya dapat mengendap di permukaan tanah, kemudian meresap ke dalam tanah dan mencemari tanah.

Cemaran yang terkandung dalam limbah masuk ke dalam tanah melalui proses infiltrasi, air limbah meresap melalui lapisan tanah permukaan. Pada proses ini cemaran juga akan terikat dan berinteraksi secara kimiawi pada partikel tanah, seperti mineral dan bahan organik yang kemudian dapat mengubah sifat fisik dan kimia tanah (Gao *et al.*, 2022).

Cemaran kemudian dapat bergerak lebih dalam ke lapisan tanah melalui proses perkolasi dan bergerak dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi lebih rendah. Beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan dan arah pergerakan cemaran selama proses perkolasi termasuk porositas tanah, tekstur, dan struktur tanah. Pergerakan cemaran melalui perkolasi dapat menyebabkan pencemaran air tanah, yang merupakan sumber vital bagi banyak ekosistem dan pemukiman manusia.

Kontaminasi tanah oleh senyawa logam berat dan senyawa organik seperti hidrokarbon minyak merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sangat serius, terutama di wilayah industri dan perkotaan. Upaya dalam penanganan kontaminasi tersebut dapat dilakukan melalui pemanfaatan biostimulan

dengan metode bioremediasi, yang terbukti efektif dan juga ramah lingkungan. Bioremediasi sendiri adalah sebuah teknik yang banyak digunakan untuk mengatasi permasalahan lingkungan, salah satunya adalah cemaran pada tanah, karena pendekatan ini tidak hanya efisien, tetapi juga mengurangi dampak buruk pada ekosistem sekitarnya.

Dengan melihat potensi tersebut, para peneliti mulai mengeksplorasi lebih lanjut terkait penggunaan biostimulan dalam bioremediasi. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki tujuan untuk mengevaluasi efektivitas pemanfaatan biostimulan dalam meningkatkan proses bioremediasi pada tanah yang terkontaminasi oleh logam berat maupun hidrokarbon minyak. Metode yang banyak diterapkan didasarkan pada desain eksperimental dari studi-studi sebelumnya, yang mencakup penambahan nutrisi, biosurfaktan, dan bahan-bahan organik ke dalam tanah. Beberapa peneliti menemukan bahwa mikroorganisme yang dapat digunakan dan menguntungkan meliputi bakteri seperti PGPRs (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) dan jamur yang bermanfaat, baik yang hidup bebas, rizosferik, ataupun endosimbiotik.

Cemaran logam berat dalam tanah perlu penanganan khusus, karena logam berat bersifat tahan terhadap degradasi, sehingga apabila tidak diserap oleh tanaman atau dihilangkan, maka dapat terakumulasi di dalam tanah dan bertahan untuk jangka waktu yang lama (Rashid, *et al.*, 2023). Kadmium (Cd), merkuri (Hg), kromium (Cr), timbal (Pb), arsenik (As), tembaga (Cu), nikel (Ni), dan seng (Zn) adalah logam berat yang sering mencemari tanah dan dapat menyebabkan efek toksik pada tanaman jika terdapat dalam konsentrasi tinggi (Abd Elnabi *et al.*, 2023). Cemaran Cd, Pb, As, Hg, dan Cr disebutkan memiliki risiko tinggi (Su *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2024). Terutama Cd dan As dilaporkan dapat mempengaruhi kesehatan manusia secara signifikan, karena memiliki risiko karsinogenik lebih tinggi dari pada logam lain (Su *et al.*, 2023). Selain itu, akumulasi Pb juga dapat menyebabkan berbagai efek buruk seperti penyakit atau kegagalan organ (Rai *et al.*, 2019).

Ada juga pelarut organik sebagai cemaran tanah. Pelarut organik adalah cairan yang penting untuk berlangsungnya reaksi, ekstraksi, pemisahan, pemurnian, dan pengeringan, yang dapat menyebabkan masalah lingkungan dan kesehatan apabila digunakan dalam jumlah besar. Pelarut aromatik (benzena, toluena), pelarut terklorinasi dan terpoliklorinasi (CCl₄, CHCl₃) dan pelarut organik lainnya (DMSO, DMF, Petroleum eter, Dietil eter, Aseton)

merupakan pelarut organik yang sering digunakan dalam teknik analisis, sehingga sering dijumpai sebagai cemaran di dalam tanah. Terutama benzena dapat terserap dalam tubuh melalui kontak epidermis yang dapat menyebabkan gejala dermatologis (Kosteswararao *et al.*, 2014).

Selain itu, antibiotik yang diproduksi industri farmasi atau kosmetik juga dapat mencemari tanah. Kadar antibiotik yang terdeteksi dalam matriks tanah berkisar dari beberapa nanogram hingga miligram per kilogram tanah (Cycoń *et al.*, 2019). Tinggi atau rendahnya kadar antibiotik di dalam tanah menghasilkan perubahan sensitivitas antibiotik pada seluruh populasi mikroba dengan perubahan genetik dalam genom bakteri dan transfer *antibiotic resistance genes* (ARG) dan *associated mobile genetic elements* (MGEs) (Grenni *et al.*, 2018).

Antibiotik umumnya bersifat mudah larut dalam air, tetapi sebagian antibiotik juga memiliki sifat yang tidak larut sehingga masuk ke dalam tanah. Di lingkungan tanah, antibiotik dapat mengalami proses abiotik dan/atau biotik yang berbeda, termasuk transformasi, degradasi, fotodegradasi, atau hidrolisis (Cycoń *et al.*, 2019). Antibiotik golongan β -laktam misalnya memiliki sifat yang rentan terhadap hidrolisis, sedangkan makrolida dan sulfonamida relatif kurang rentan terhadap hidrolisis, sehingga banyak ditemukan keberadaannya di dalam tanah (Braschi *et al.*, 2013; Mitchell *et al.*, 2015). Keberadaannya di dalam tanah dipengaruhi oleh pH. Sulfonamida menunjukkan penurunan absorpsi seiring dengan naiknya pH tanah, sementara pengikatan makrolida oleh komponen tanah meningkat dengan turunnya pH (Cycoń *et al.*, 2019).

Selain antibiotik, hormon juga dapat mencemari tanah. Pelepasan hormon steroid yang diproduksi oleh industri farmasi dan kosmetik ke lingkungan bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah dalam kisaran nanogram hingga mikrogram per liter, masih menimbulkan kekhawatiran global terhadap tanah, karena dianggap sebagai sumber pengganggu endokrin (Almazrouei *et al.*, 2023). Diperkirakan 700 kg/tahun hingga 30.000 kg/tahun hormon steroid dibuang ke saluran pembuangan (Adeel *et al.*, 2017). Beberapa penelitian mengevaluasi steroid estrogenik di lingkungan dan menyajikan efek buruknya. Progesteron dan androgen masih kurang dipelajari terkait dampak lingkungannya (Almazrouei *et al.*, 2023).

Mekanisme dan Fungsi Biostimulan

Upaya remediasi, termasuk dalam penggunaan biostimulan menunjukkan potensi dalam memperbaiki kondisi tanah yang tercemar. Biostimulan merupakan zat atau mikroorganisme yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman, meskipun definisi dan regulasi di berbagai negara belum pasti, namun penggunaannya dalam pertanian dan rehabilitasi tanah terus berkembang (Calvo *et al.*, 2014; Halpern *et al.*, 2015).

Beberapa mekanisme dan fungsi biostimulan, seperti pada zat humic dan asam fulvik, keduanya termasuk produk alami hasil peruraian bahan organik di dalam tanah. Zat ini mampu meningkatkan kesuburan tanah dengan cara meningkatkan kapasitas tukar kation dan ketersediaan nutrisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan zat humik dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman secara signifikan, dengan meta-analisis menunjukkan peningkatan berat kering hingga 22% untuk tunas dan 21% untuk akar (Rose *et al.*, 2014). Dapat disimpulkan bahwa dengan adanya peningkatan penyerapan nutrisi, maka dapat membantu tanaman bertahan dari stres akibat pencemaran.

Selain dua zat tersebut di atas, juga ditemukan senyawa nitrogen dan hidrolisat protein dari limbah hewan yang berfungsi sebagai biostimulan. Mereka dapat membantu dalam modifikasi penyerapan nitrogen dan asimilasi, berkontribusi dalam pertumbuhan tanaman yang lebih baik di tanah yang tercemar. Beberapa senyawa, seperti betain dan poliamina, berfungsi sebagai agen anti-stres yang mampu melindungi tanaman dari efek negatif logam berat (Vranova *et al.*, 2011).

Plant Biostimulant

Plant Biostimulant merupakan bahan yang digunakan dalam sistem pertanian yang berfungsi untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman tanpa berfungsi sebagai pupuk atau pestisida. *Plant biostimulant* dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap berbagai jenis stres dan telah diuji terhadap tanaman yang tumbuh liar di daerah tercemar. Salah satu pencemarannya yaitu pencemaran tanah oleh logam berat (High Metal) atau pestisida. Kedua cemaran ini menjadi salah satu polutan terbesar di dunia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Plant biostimulan* dapat mengurangi toksisitas logam berat (HM) pada tanaman (Calvo *et al.*, 2014). Telah didokumentasikan efek yang dipicu oleh produk berbasis protein, asam fulvik dan humik.

Biostimulan yang mengandung peptida dan asam amino dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap HM. Mekanisme aksi kedua biostimulan tersebut melalui induksi aktivitas enzim antioksidan spesifik dan adanya peningkatan kandungan antioksidan non-enzimatik. Kedua fungsi tersebut memiliki peran penting dalam kelangsungan hidup tanaman. Selain itu, zat humik mampu berinteraksi dengan HM melalui gugus karboksilat dan fenolik, yang menyebabkan adanya pembentukan kompleks kimia. Proses inilah yang dapat menurunkan mobilitas HM di dalam tanah, sehingga mengurangi ketersediaannya untuk diserap oleh akar tanaman. Dengan demikian, efek toksik HM terhadap tanaman dapat diminimalisasi dan tanaman dapat tumbuh lebih baik, meskipun di lingkungan yang terkontaminasi.

Pemanfaatan lain pada *plant biostimulant* yaitu menggunakan peran mikroba ataupun bakteri. Pemanfaatan rhizobacteria, khususnya pada PGPB (*Plant Growth Promoting Bacteria*), memiliki peran dalam memulihkan tanah yang tercemar HM seperti Cd. Rhizobacteria ini mampu mengurangi toksisitas logam dan menghasilkan tanaman jadi lebih toleran terhadap stres akibat pencemaran tanah. Di samping itu, peneliti menemukan bahwa PGPB *Bacillus sp.* dapat menurunkan persentasi Cd hingga sebesar 11,34% dibandingkan kontrol tanpa penambahan PGPB.

Rembesan Crude Oil diatasi dengan biostimulan

Limbah organik pasar mengandung kadar N, P dan K cukup tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan biostimulan organik yang memiliki nilai manfaat tinggi. Biostimulan organik memiliki kandungan unsur hara seperti nitrogen (N) dan fosfor (P), sehingga memiliki kemampuan untuk mengembalikan kesuburan tanah yang telah tercemar limbah tambang minyak. Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh perindustrian minyak merupakan permasalahan yang serius. Sifat fisik dan kimia tanah yang tercemar akan mengalami perubahan dengan adanya pencemaran tersebut (Mukaromah, 2014 dalam Abdillah *et al.*, 2018). Salah satu contoh kasus pencemaran tanah oleh rembesan *crude oil* terjadi di Kabupaten Bojonegoro yang berada di wilayah Kecamatan Kadewan. Salah satu Proses biologis dalam bioremediasi dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan pencemaran tanah oleh tambang minyak (Abdillah *et al.*, 2018).

Bioremediasi adalah penghilangan, pemutusan, maupun pengubahan ikatan kimia dari kontaminan, sehingga berubah menjadi senyawa yang lebih aman dengan bantuan jasa mikroba (Agamuthu, 2013 dalam Abdillah *et al.*, 2018). Bioremediasi merupakan proses yang paling menguntungkan, karena biaya yang lebih murah serta waktu yang dibutuhkan tidak terlalu lama (Haghollahi, 2016 dalam Abdillah *et al.*, 2018). Dengan proses bioremediasi, lahan yang telah tercemar dapat dimanfaatkan lagi menjadi lahan hijau, karena kontaminan telah dihilangkan dan unsur hara di tanah telah direvitalisasi (Abdillah *et al.*, 2018).

Peningkatan kadar nitrogen dan fosfor pada biostimulan berbahan baku sampah organik pasar dapat dilakukan dengan penambahan urin kelinci. Urin kelinci mengandung kadar nitrogen paling banyak dibandingkan bahan yang lain sehingga mampu meningkatkan kadar nitrogen pada biostimulan. Keterkaitan yang erat antara limbah organik pasar yang dapat diolah menjadi pupuk cair dan dimanfaatkan sebagai biostimulan bioremediasi limbah tambang minyak akan menghasilkan suatu inovasi yang sangat bermanfaat dan menjadi salah satu cara untuk mengembangkan ilmu penelitian (Abdillah *et al.*, 2018).

Metode Biostimulasi untuk *Crude Oil*

Bahan-bahan yang digunakan adalah limbah organik pasar yang terdiri dari buah, sayur, dan rimpang yang diambil dari Pasar Ungaran Kabupaten Semarang, Na_2SO_4 , toluene (Analar grade), urine kelinci dan EM4, tetes tebu, dan dedak padi. Sedangkan alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah mesin pencacah, shaker, spectrophotometer, satu set alat-alat beaker glass, pipet volume, pipet ukur, timbangan, (Abdillah *et al.*, 2018). Metode penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap yaitu (1) pembuatan biostimulan, (2) proses bioremediasi menggunakan biostimulan, (3) analisis komposisi biostimulan, dan (4) uji tingkat pencemaran setelah bioremediasi.

Pembuatan Biostimulan

Pada tahap *Pembuatan Biostimulan* dengan limbah organik pasar (sayur 70% (b/b), buah 20% (b/b), bumbu dan lain-lain 10% (b/b), dicacah menggunakan mesin pencacah, selanjutnya diperas dan diambil sari patinya. Sari pati diencerkan dengan air (50:50, v/v) dan diperkaya dengan dedak padi, masing-masing sebanyak 10 gram/liter campuran bahan. Kultur mikroba dibuat dari EM4 yang dicampur dengan urine kelinci dan tetes tebu sebagai media

pertumbuhan mikroorganisme. Kondisi media pertumbuhan dijaga pada temperatur 30°C. Campuran bahan selanjutnya diinokulasi dengan kultur mikroba dan difermentasi secara anaerobik selama 21 hari (Abdillah *et al.*, 2018).

Proses Bioremediasi Tanah

Tahap kedua, *Proses Bioremediasi Tanah* yang tercemar oleh limbah tambang minyak yang diambil langsung dari penambangan minyak tradisional di Cepu dan tanah yang dicampur oli mesin bekas (Agamuthu, 2013 dalam Abdillah *et al.*, 2018). Tanah dengan massa 1,5 kg dipisahkan dari pengotor, kemudian masing-masing dimasukkan ke dalam wadah dengan label 1 s.d 20. Masing-masing tanah dicampur dengan oli bekas 10% (b/b) atau 150 gram dan didiamkan selama dua hari. Setelah dua hari, biostimulan diberikan secara merata ke dalam tanah dengan label 2 s.d 10; 12 s.d 20 digunakan sebagai variabel, kontrol tidak ada perlakuan lain terhadap tanah yang telah dicampur dengan oli bekas. Tanah label 1 dan 11 diinkubasi pada temperatur ruangan (30°C) (Abdillah *et al.*, 2018).

Pengujian Komposisi Biostimulan

Berdasarkan penelitian oleh Abdillah *et al.*, 2018, metode ketiga yaitu *Pengujian Komposisi Biostimulan* yang selesai difermentasi kemudian diuji kandungan N, P, K, C-organik, dan kadar air yang terkandung di dalamnya dengan metode uji standar (Tabel 1).

Tabel 1. Metode Pengujian N, P, K, C-organik dan Kadar air

Sampel	Metode Pengujian
C organik	Walkley – Black Methode
N total	Kjeldahl
P total	SSA
K total	SSA
Kadar air	SNI 01-2891-1992 Btr 5.1

Uji Tingkat Pencemaran Setelah Bioremediasi

Tahap pengujian ke-empat yaitu uji tingkat pencemaran setelah bioremediasi yang ditujukan untuk mengukur perubahan kadar total petroleum hidrokarbon (TPH) sebelum dan sesudah proses bioremediasi. Sodium sulfat anhidrat (Na_2SO_4) sebanyak 2 gram ditambahkan ke dalam sampel tanah 1 s.d 20 untuk menyerap kandungan minyak di dalam tanah. Kandungan hidrokarbon dari tanah dapat diketahui dengan mencampurkan 10 gram

sampel tanah ke 20 ml toluene di dalam erlenmeyer 250 mL.

Setelah proses *shaking* selama 60 menit dengan kecepatan 200 rpm, disaring untuk mendapatkan fasa liquid dan ekstrak yang dihasilkan, kemudian ekstrak yang dihasilkan diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 420 nm. TPH pada tanah dihitung menggunakan kurva kalibrasi yang didapatkan dari panjang gelombang terpanjang dari oli bekas yang dilarutkan pada toluene (Abdillah *et al.*, 2018).

Hasil Uji Produk Biostimulan

Produk biostimulan memiliki kandungan N, P, K dan C-organik yang tinggi berdasarkan hasil pengujian produk fermentasi biostimulan berbahan baku sampah organik pasar. Pengujian dilakukan di laboratorium Badan Penelitian dan Pengembangan Industri Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, Semarang (Abdillah *et al.*, 2018).

Tabel 2. Hasil uji sampel variabel 5%

Unsur sampel	Kadar (ppm)
C organik	5500
N total	690
P total	100
K total	1270
Kadar air	967.200

Tabel 3. Hasil uji sampel variabel 10%

Unsur sampel	Kadar (ppm)
C organik	11.800
N total	830
P total	110
K total	1760
Kadar air	967.200

Tabel 4. Hasil uji sampel variabel 15%

Unsur sampel	Kadar (ppm)
C organik	12.330
N total	830
P total	900
K total	1690
Kadar air	965.700

Variabel 5%, 10%, dan 15% didasarkan pada konsentrasi pemberian EM4, apabila dianalisis dari hasil uji sampel dapat diketahui bahwa pemberian EM4 dengan kadar 15% memiliki kandungan unsur-unsur yang cukup tinggi jika dibandingkan variabel 5% dan 10% (Tabel 3 dan Tabel 4).

Sementara itu, menurut Abdillah *et al.* (2018), produk biostimulan berbahan baku sampah organik pasar dibandingkan kandungan unsur biostimulan yang telah beredar di pasaran (Tabel 5) dan pupuk organik cair (POC) berbahan baku kotoran kambing (Tabel 6), menunjukkan unsur kandungan biostimulan yang lebih besar.

Tabel 5. Kandungan biostimulan di pasaran

Sampel	Kadar (ppm)
C organik	1270
N total	410
P total	1490
K total	590

Tabel 6. Kandungan POC berbahan baku kotoran kambing

Sampel	Kadar (ppm)
C organik	510
N total	170
P total	80
K total	2510
Kadar air	990.800

Tabel 7. Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Cair Organik

Sampel	Standar Mutu (%)
C organik	Min 6
N total	3-6
P total	3-6
K total	3-6
Kadar air	15-25

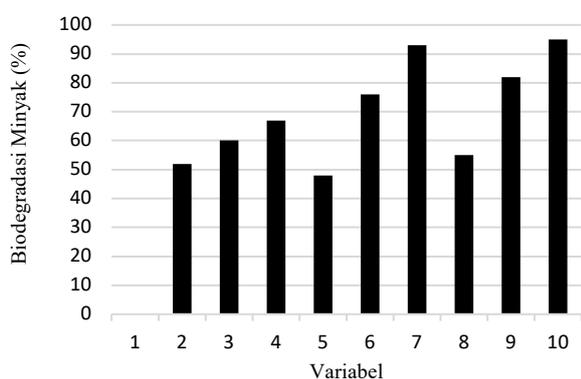
Biostimulan berbahan baku sampah organik pasar memiliki kandungan N, P, K, dan C-organik yang lebih besar jika dibandingkan dengan produk biostimulan yang beredar di pasaran dan pupuk organik cair berbahan baku kotoran kambing. Produk biostimulan berbahan

baku sampah organik pasar berpotensi untuk dikembangkan menjadi produk biostimulan unggulan (Abdillah et al., 2018).

Berdasarkan Peraturan Menteri Pertanian Nomor 70 tahun 2011, pupuk organik, pupuk hayati dan pembenah tanah, harus memenuhi persyaratan teknis minimal pupuk cair organik (Tabel 7). Dapat disimpulkan bahwa produk biostimulan berbahan baku sampah organik pasar memenuhi syarat sebagai biostimulan. Hasil ini dapat dijadikan salah satu model untuk mengembangkan produk biostimulan yang sederhana dan biayanya rendah.

Bioremediasi limbah tambang minyak menggunakan Biostimulan

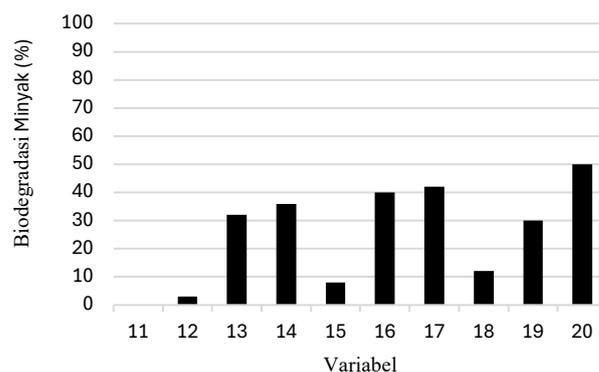
Bioremediasi dapat diterapkan pada lahan yang tercemar pestisida, logam berat, minyak bumi dan lain sebagainya. Produk biostimulan berbahan baku sampah organik pasar diaplikasikan pada tanah tercemar limbah tambang minyak. Sampel limbah tambang minyak diambil dari penambangan minyak tradisional yang terletak di kecamatan Cepu, Kabupaten Blora. Tanah tercemar limbah tambang minyak diinkubasikan dengan biostimulan BOW dengan kadar pemberian biostimulan 5% b/b; 10% b/b dan 15% b/b pada suhu ruangan (25-30°C) (Abdillah et al., 2018). Hasil bioremediasi menunjukkan tingkat penurunan kandungan minyak yang signifikan dari oli bekas di dalam tanah (Gambar 1).



Gambar 1. Persentase Biodegradasi Oli Bekas

Persentase tingkat penurunan kadar hidrokarbon yang dianalisis menggunakan spektrofotometer menunjukkan bahwa proses biodegradasi menggunakan berbagai variabel, tingkat degradasi terbesar terjadi pada variabel 7 dan 10 yaitu biostimulan dengan konsentrasi 15% dan kadar pemberian biostimulan sebesar 15% (b/b) (Abdillah et al., 2018). Tingkat penurunan Biodegradasi tanah tercemar limbah

minyak dinyatakan sebagai kadar hidrokarbon menunjukkan bahwa tingkat penurunannya



Gambar 2. Persentase Biodegradasi Limbah Minyak

tertinggi diperoleh pada sampel nomor 17 dan 20 (Gambar 2), yaitu biostimulan dengan konsentrasi 15% dan kadar pemberian biostimulan sebesar 15% (b/b) (Abdillah et al., 2018).

Penerapan teknologi bioremediasi khususnya metode biostimulasi di Indonesia berpeluang untuk dikembangkan, tidak hanya terbatas pada cemaran minyak bumi di industri migas, tetapi juga pencemaran di industri otomotif, SPBU dan industri lainnya seperti pertanian. Polutan targetnya bukan hidrokarbon minyak bumi saja, tetapi juga senyawa inorganik lainnya seperti pestisida dan logam berat.

Biaya untuk proses bioremediasi berada pada rentang US \$25 – 75 per ton tanah olahan, tergantung pada karakter pencemarnya. Biaya ini relatif lebih murah dibandingkan teknik pengolahan lainnya, misalnya insinerasi yang dapat mencapai 4 sampai 10 kali lipatannya (KLHK, 2015)

Bioremediasi sebagai teknologi yang dapat digunakan untuk membersihkan berbagai jenis polutan bukan berarti tanpa keterbatasan. Bioremediasi tidak dapat diaplikasikan untuk semua jenis polutan, misalnya untuk pencemaran dengan konsentrasi polutan yang sangat tinggi sehingga toksik untuk mikroba atau untuk pencemar jenis logam berat misal kadmium dan Pb.

KESIMPULAN

Bioremediasi dengan *Biostimulant Organic Waste* (BOW) berbahan baku sampah organik pasar memiliki nilai 12.330 ppm; 830 ppm; 900 ppm; dan 1690 ppm masing-masing untuk unsur C-organik, N, P dan K. Nilai tersebut lebih tinggi

jika dibandingkan produk yang beredar di pasaran dan pupuk organik cair berbahan baku kotoran kambing. Nilai BOW telah memenuhi persyaratan teknis minimal pupuk cair organik dan pembenah tanah. Hasil pengujian menunjukkan penurunan jumlah hidrokarbon terlarut dalam tanah yakni 94,6026% untuk tanah tercemar limbah oli dan penurunan 48,4672% pada tanah tercemar limbah tambang minyak, sehingga pemanfaatan BOW sebagai biostimulan merupakan terobosan yang dapat mengatasi masalah limbah dan pencemaran tanah akibat limbah pertambangan minyak. Di bidang pertanian, BOW dapat berperan sebagai pupuk organik cair yang mengandung unsur hara makro dan mikro, serta mikroorganisme yang berperan penting dalam membantu pertumbuhan dan kesehatan tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalfifa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Alhoriény, N. A., Abd Elaty, A. E., Elgendy, I. M., Etman, A. E., Saad, K. E., Tsigkou, K., Ali, S. S., Kornaros, M., & Mahmoud, Y. A. (2023). Toxicity of Heavy Metals and Recent Advances in Their Removal: A Review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- Abdillah, H., Cahyarini, N. S., & Mahardhika, M. A. (2018). Biostimulan Bioremediasi dari Limbah Organik Pasar Sebagai Solusi Pencemaran Limbah Pertambangan Minyak. *Seminar Nasional Teknik Kimia Ecosmart*, 56–64. <https://jurnal.uns.ac.id/ecosmart/article/view/129576>
- Adeel, M., Song, X., Wang, Y., Francis, D., & Yang, Y. (2017). Environmental impact of estrogens on human, animal and plant life: A critical review. *Environment international*, 99, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.010>
- Almazrouei, B., Islayem, D., Alskafi, F., Catacutan, M. K., Amna, R., Nasrat, S., Sizirici, B., & Yildiz, I. (2023). Steroid hormones in wastewater: Sources, treatments, environmental risks, and regulations. *Emerging Contaminants*, 9(2), Article 100210. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100210>
- Azubuiké, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 32(11). <https://doi.org/10.1007/S11274-016-2137-X>
- Bartucca, M. L., Cerri, M., Del Buono, D., & Forni, C. (2022). Use of Biostimulants as a New Approach for the Improvement of Phytoremediation Performance—A Review. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 1946, 11(15), 1946. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11151946>
- Bartucca, M. L., Cerri, M., Del Buono, D., & Forni, C. (2022). Use of Biostimulants as a New Approach for the Improvement of Phytoremediation Performance—A Review. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 1946, 11(15), 1946. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11151946>
- Braschi, I., Blasioli, S., Fellet, C., Lorenzini, R., Garelli, A., Pori, M., & Giacomini, D. (2013). Persistence and degradation of new β -lactam antibiotics in the soil and water environment. *Chemosphere*, 93(1), 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.016>
- Briški, F. & Vuković Domanovac, M. (2017). Environmental microbiology. *Physical Sciences Reviews*, 2(11), 20160118. <https://doi.org/10.1515/psr-2016-0118>
- Brown, L. D., Cologgi, D. L., Gee, K. F., & Ulrich, A. C. (2017). Bioremediation of Oil Spills on Land. 699-729. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809413-6.00012-6>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Cycoń, M., Mrozik, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2019). Antibiotics in the Soil Environment-Degradation and Their Impact on Microbial Activity and Diversity. *Frontiers in microbiology*, 10, 338. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00338>
- Del Buono, D. (2020). Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. *The Science of the Total Environment*, 751, 141763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141763>
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.02>

1

- Dores-silva, P. R., Cotta, J. A.O., Landgraf, M. D., & Rezende, M. O.O. (2019). The application of the vermicomposting process in the bioremediation of diesel contaminated soils. *54*, 598-604. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1611303>
- Fidiastuti, H. R., Prabowo, C. A., Lathifa, A. S., Amin, M., & Utomo, Y. (2019). Bioremediasi Limbah Industri Pemanfaatan Mikroba dalam Pengolahan Limbah Industri. Forind (p.97). <http://repository.unitri.ac.id/2200/1/>
- Folch, A., Vilaplana, M., Amado, L., Vicent, T., & Caminal, G. (2013). Fungal permeable reactive barrier to remediate groundwater in an artificial aquifer. *Journal of Hazardous Materials*, *262*, 554-560. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.09.004>
- Forni, C., Duca, D., & Glick, B. R. (2017). Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria. *Plant and Soil*, *410*(1–2), 335–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3007-x>
- Frascari, D., Zanaroli, G., & Danko, A. S. (2015). In situ aerobic cometabolism of chlorinated solvents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, *283*, 382-399. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.041>
- Gao, J., Faheem, M., & Yu, X. (2022). Global research on contaminated soil remediation: a bibliometric network analysis. *Land*, *11*(9), 1581. <https://doi.org/10.3390/land11091581>
- Gamalero, E.; Berta, G.; Massa, N.; Glick, B.R.; Lingua, G. Interactions between *Pseudomonas putida* UW4 and *Gigaspora rosea* BEG9 and their consequences for the growth of cucumber under salt-stress conditions. *J. Appl. Microbiol.* 2010, *108*, 236–245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04414.x>
- Grenni, P., Ancona, V., & Caracciolo, A. B. (2018). Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review. *Microchemical Journal*, *136*, 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.02.006>
- Havugimana, E. R. N. E. S. T. E., Bhople, B. S., Kumar, A. N. I. L., Byiringiro, E. M. M. A. N. U. E. L., Mugabo, J. P., & Kumar, A. R. U. N. (2017). Soil pollution—major sources and types of soil pollutants. *Environmental science and engineering*, *11*, 53-86. <https://ocd.lcwu.edu.pk/cfiles/Environmenta>
- I%20Sciences/Maj/Env-110/
- He, X., Zhang, Y., Shen, M., Zeng, G., Zhou, M., & Li, M. (2016). Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials. *Bioresource Technology*, *218*, 867-873. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.045>
- Huang, Y., Chen, Q., Deng, M., Japenga, J., Li, T., Yang, X., & He, Z. (2018). Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. *Journal of environmental management*, *207*, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.072>
- Karmegam, N., Vijayan, P., Prakash, M., & Paul, J. A. J. (2019). Vermicomposting of paper industry sludge with cowdung and green manure plants using *Eisenia fetida*: A viable option for cleaner and enriched vermicompost production. *Journal of Cleaner Production*, *228*, 718-728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.313>
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. *Plants* (Basel, Switzerland), *12*(15), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Koteswararao, P. R., Tulasi, S. L., & Pavani, Y. (2014). Impact of Solvents on Environmental Pollution. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, *(3)*, 132–135. ISSN: 0974-2115. <https://www.jchps.com/specialissues/>
- Kumari, V., & Shukla, S. K. (2021). Bioremediation of heavy metals: Emerging trends and future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(5), 106004. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106004>
- Li, L., Han, L., Liu, A., & Wang, F. (2022). Imperfect but Hopeful: New Advances in Soil Pollution and Remediation. *International journal of environmental research and public health*, *19*(16), 10164. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610164>
- Melati, I. (2020). Teknik Bioremediasi: Keuntungan, Keterbatasan, dan Prospek Riset. *Prosiding Seminar Nasional BIOTIK*, *8*(1), 273-283. <http://doi.org/10.22373/pbio.v8i1.9650.g5433>
- Mitchell, S. M., Ullman, J. L., Teel, A. L., & Watts,

- R. J. (2015). Hydrolysis of amphenicol and macrolide antibiotics: Chloramphenicol, florfenicol, spiramycin, and tylosin. *Chemosphere*, 134, 504-511. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.050>
- Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A., & Landrigan, P. J. (2023). Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about?. *Cardiovascular research*, 119(2), 440-449. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvac082>
- Nadhirawaty, R., & Titah, H. S. (2019). Simultaneous Bioaugmentation and Biostimulation to Remediate Soil Contaminated by Ship Dismantling in Bangkalan District, Indonesia. *Journal of health & pollution*, 9(24), 191212. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.24.191212>
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment international*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., & Beck, L. (2023, June 1). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
- Romantschuk, M., Lahti-Leikas, K., Kontro, M., Galitskaya, P., Talvenmäki, H., Simpanen, S., Allen, J. A., & Sinkkonen, A. (2023). Bioremediation of contaminated soil and groundwater by in situ biostimulation. *Frontiers in microbiology*, 14, 1258148. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1258148>
- Roy, M., Giri, A. K., Dutta, S., & Mukherjee, P. (2015). Integrated phytobial remediation for sustainable management of arsenic in soil and water. *Environment International*, 75, 180-198. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.010>
- Shofiandi, K.D., Naniek, R. J.A.R., (2021). Bioremediasi tanah tercemar hidrokarbon dengan metode bioremediasi di Wonocolo, Bojonegoro. *Esec*, 2(1)75, 60-69.
- Su, Q., Zhang, X., Zhang, Y., Sun, G., Li, Z., Xiang, L., & Cai, J. (2023). Risk assessment of heavy metal pollution in agricultural soil surrounding a typical pharmaceutical manufacturing complex. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1105910>
- Sun, J., He, X., Yilin, L. E., Al-Tohamy, R., & Ali, S. S. (2024). Potential applications of extremophilic bacteria in the bioremediation of extreme environments contaminated with heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 352, 120081. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120081>
- Thapa, B., Ajay Kumar, K. C., & Ghimire, A. (2012). A review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 8(1), 164-170. <https://doi.org/10.3126/kuset.v8i1.6056>
- Xin, X., Shentu, J., Zhang, T., Yang, X., Baligar, V. C., & He, Z. (2022). Sources, indicators, and assessment of soil contamination by potentially toxic metals. *Sustainability*, 14(23), 15878. <https://doi.org/10.3390/su142315878>