

Bioindikator dan Bioremediasi Laut: Peran Mikroorganisme Laut dalam Mengurangi Pencemaran

Christi V. Kunardi¹, Holyjoy H.P. Moniung¹, Chivie K. Bojoh¹, Indri M.A. Paat^{*1}, Agustina Tangapo²

¹Program Studi Farmasi, Fakultas MIPA, Universitas Sam Ratulangi

²Jurusan Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Sam Ratulangi

*Email Penulis Korespondensi: indripaat1708@gmail.com

Abstrak. Laut merupakan bagian penting dari lingkungan hidup yang memiliki banyak manfaat, baik sebagai tempat tinggal makhluk laut maupun sebagai penopang kehidupan manusia. Akan tetapi, laut sekarang ini sering tercemar oleh aktivitas manusia, seperti pembuangan limbah industri, pertanian, dan rumah tangga. Pencemaran tersebut membuat air laut menurun kualitasnya dan bisa mengganggu kehidupan ikan, tumbuhan laut, serta organisme lain yang ada di dalamnya. Namun demikian, terdapat permasalahan yaitu cara-cara lama yang digunakan untuk mendeteksi dan mengatasi pencemaran sering kurang ramah lingkungan dan tidak dapat menyelesaikan masalah secara menyeluruh. Oleh karena itu, perlu adanya cara lain yang lebih baik dan lebih aman. Salah satu cara yang bisa digunakan adalah memanfaatkan mikroorganisme laut. Mikroorganisme laut, seperti bakteri, alga, dan jamur, dapat digunakan sebagai bioindikator karena mereka dapat menunjukkan adanya pencemaran melalui perubahan dalam pertumbuhan atau aktivitasnya. Selain itu, mikroorganisme juga dapat dipakai dalam proses bioremediasi, yaitu membersihkan pencemaran dengan cara menguraikan, menyerap, atau mengikat zat berbahaya yang ada di laut. Dengan cara ini, pencemaran bisa dikurangi secara alami tanpa merusak lingkungan. Kajian ini merupakan review literatur. Hasil kajian menunjukkan bahwa pemanfaatan mikroorganisme laut cukup menjanjikan, baik untuk memantau pencemaran maupun untuk mengurangi dampaknya. Mikroorganisme laut dapat menjadi solusi sederhana, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk menjaga laut tetap bersih dan sehat.

Kata Kunci: mikroorganisme laut; bioindikator; bioremediasi; pencemaran

PENDAHULUAN

Pencemaran laut akibat aktivitas manusia, seperti pembuangan limbah industri, pertanian, dan domestik, telah menyebabkan akumulasi berbagai polutan berbahaya di ekosistem laut, terutama logam berat dan plastik. Logam berat seperti merkuri, timbal, dan kadmium bersifat toksik, dapat terakumulasi dalam jaringan organisme laut, dan menimbulkan efek negatif jangka panjang pada rantai makanan serta kesehatan manusia. Sementara itu, polusi plastik, khususnya mikroplastik, telah menjadi ancaman global yang tersebar luas di seluruh perairan laut dan berpotensi mengganggu fungsi ekosistem serta membahayakan organisme laut (Areco *et al.*, 2021).

Untuk mengatasi permasalahan ini, pendekatan bioremediasi berbasis mikroorganisme laut semakin mendapat perhatian karena dinilai ramah lingkungan dan berkelanjutan. Mikroorganisme laut, seperti bakteri dan alga, memiliki kemampuan unik untuk mendegradasi, mengakumulasi, atau mentransformasi polutan seperti logam berat, hidrokarbon, dan plastik menjadi bentuk yang kurang berbahaya. Selain itu, beberapa organisme laut juga dapat berfungsi sebagai bioindikator, yaitu organisme yang mampu memberikan informasi tentang tingkat pencemaran dan kesehatan lingkungan laut melalui perubahan fisiologis atau komposisi komunitasnya. Pendekatan ini tidak hanya membantu memantau kondisi ekosistem, tetapi juga menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi dampak polusi laut secara efektif dan berkelanjutan (Teiba *et al.*, 2024).

BIOINDIKATOR KESEHATAN LAUT

Bioindikator kesehatan laut adalah organisme yang digunakan untuk menilai kondisi ekosistem laut dan mendeteksi adanya polusi atau perubahan lingkungan. Tiga kelompok utama yang sering digunakan sebagai bioindikator adalah plankton, bivalvia (kerang-kerangan), dan bakteri indikator (Husamah, 2019).

Plankton sebagai Bioindikator

Plankton, baik fitoplankton maupun zooplankton, sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan dan polusi, sehingga sering digunakan sebagai indikator awal kesehatan ekosistem laut. Komposisi, kelimpahan, dan keanekaragaman plankton dapat berubah secara signifikan akibat pencemaran logam berat, nutrisi, atau bahan organik. Plankton juga mampu memberikan sinyal dini terhadap perubahan kualitas air, bahkan sebelum polutan terdeteksi secara kimiawi. Selain plankton berukuran besar, kelompok pico- dan nanoplankton (<20 µm) kini juga diakui penting sebagai indikator kesehatan ekosistem karena kontribusinya yang besar terhadap biomassa dan responsnya yang cepat terhadap tekanan lingkungan seperti perubahan suhu dan nutrisi. Selain itu, plankton juga dapat membawa gen penanda resistensi antimikroba, sehingga dapat digunakan untuk memantau kontaminasi *emerging pollutants* (Chandel *et al.*, 2023).

Jenis-jenis plankton yang umum digunakan sebagai bioindikator meliputi fitoplankton seperti *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp., *Chaetoceros* sp., dan *Coscinodiscus* sp., yang diketahui sensitif terhadap peningkatan nutrisi dan logam berat di perairan. Penelitian oleh Bourdonnais *et al.* (2024) menunjukkan bahwa perubahan komposisi komunitas fitoplankton dan zooplankton—termasuk deteksi gen *sul1* dan *int1* dalam komunitas plankton—dapat menjadi indikator dini kontaminasi resistensi antimikroba di ekosistem laut (monitoring amplifikasi gen *tetA*, *bla_TEM*, *sul1*, *int1* dalam plankton) (Bourdonnais *et al.*, 2024).

Bivalvia sebagai Bioindikator

Bivalvia seperti remis, kerang, dan tiram merupakan bioindikator yang sangat efektif karena sifatnya yang sessile (menetap), filter feeder, dan mampu mengakumulasi berbagai polutan seperti logam berat, mikroplastik, pestisida, dan patogen dalam jaringan. Bivalvia juga digunakan dalam biomonitoring untuk mendeteksi efek gabungan antara polusi dan infeksi parasit, serta perubahan fisiologis akibat paparan polutan. Namun, efektivitas bivalvia sebagai bioindikator mikroplastik dapat dipengaruhi oleh selektivitas dalam mengonsumsi partikel plastik, sehingga interpretasi data perlu mempertimbangkan karakteristik partikel dan spesies bivalvia yang digunakan. Selain itu, biomarker biokimia seperti aktivitas enzim dan tingkat stres oksidatif pada bivalvia dapat digunakan untuk menilai tingkat paparan polutan (Chahouri *et al.*, 2022).

Beberapa penelitian nyata telah memanfaatkan spesies *Perna viridis*, *Crassostrea gigas*, dan *Mytilus edulis* sebagai bioindikator utama di wilayah tropis dan subtropis. *Perna viridis* misalnya digunakan dalam studi “Mussels as Bioindicators ... *Perna viridis*” untuk memantau fluktuasi musiman logam berat (Cd, Pb, Hg, Ni, Cr, Cu, As, Zn) dalam jaringan otot dan hepatopankreas kerang hijau di pesisir Vietnam (Nguyen Thanh Kim *et al.*, 2025). Di Indonesia, tinjauan “The Use of Green Mussel as Bioindicator of Heavy Metal Pollution in Indonesia” menggambarkan bahwa *P. viridis* dari berbagai lokasi pantai Indonesia menunjukkan konsentrasi Pb, Hg, Cd dalam jaringan yang melebihi batas aman pada beberapa sampel (Saleh, 2021).

Bakteri Indikator

Bakteri indikator, baik yang hidup bebas di air maupun yang berasosiasi dengan organisme laut, juga berperan penting sebagai bioindikator kesehatan laut. Komposisi komunitas bakteri dapat berubah secara signifikan akibat paparan polutan seperti logam berat, hidrokarbon, dan *persistent organic pollutants*. Beberapa kelompok bakteri, seperti *Vibrio*, dapat terakumulasi dalam jaringan bivalvia dan digunakan untuk memantau risiko kesehatan manusia serta status ekosistem. Selain itu, keberadaan gen penanda resistensi antimikroba pada komunitas bakteri planktonik juga dapat digunakan untuk memantau kontaminasi *emerging pollutants* di laut (Bourdonnais *et al.*, 2024).

Untuk bakteri, genus *Vibrio* sering muncul dalam studi sebagai indikator mikrobiologi laut karena kemampuannya merespon kondisi lingkungan yang berubah dan berasosiasi dengan plankton maupun organisme laut lainnya. Misalnya, dalam kajian Microbiota characterization of the green mussel *Perna viridis* (Microbiology, 2024), dilaporkan bahwa bakteri pada jaringan kerang hijau memuat patogen *Vibrio* sp. dan komunitas mikrobiota ini sangat dipengaruhi oleh kualitas lingkungan laut (Microbiology, 2024).

MIKROBA BIOREMEDIASI

Mikroba bioremediasi adalah makhluk hidup yang dapat digunakan untuk memulihkan kondisi lingkungan, terutama bakteri, yang mampu membersihkan lingkungan dari polutan seperti hidrokarbon (minyak bumi) dan logam berat. Bakteri pendegradasi hidrokarbon, seperti *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Alcanivorax*, dan *Halomonas*, dapat memanfaatkan senyawa hidrokarbon sebagai sumber energi dan nutrisi. Mereka menghasilkan enzim khusus yang memecah hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya, sehingga membantu mengurangi pencemaran minyak di tanah dan air. Selain itu, beberapa bakteri juga mampu melakukan biosorpsi logam berat, yaitu mengikat dan mengendapkan logam seperti timbal, kadmium, dan arsenik, sehingga logam tersebut menjadi tidak mudah bergerak dan tidak beracun bagi lingkungan (Dell'Anno, 2022).

Anggota genus *Alcanivorax* menunjukkan adaptasi ekologis dan fisiologis yang memungkinkan mereka menjadi penjajah awal pada permukaan plastik laut (plastisphere) dan debris yang mengandung hidrokarbon. Mekanisme awal kolonisasi bergantung pada mobilitas sel (flagel) dan pembentukan biofilm yang memungkinkan sel menempel pada permukaan polimer; setelah terkolonisasi, sel-sel *Alcanivorax* mengekspresikan enzim oksidatif khusus — terutama alkane hydroxylases (misal AlkB, LadA) — yang mengoksidasi alkana menjadi alkohol, aldehid, dan selanjutnya asam lemak, sehingga mengubah substrat hidrofobik menjadi bentuk yang lebih polar dan dapat dimetabolisme melalui β -oxidation menuju CO_2 dan H_2O . Selain itu, beberapa isolat memproduksi biosurfaktan atau membran/permukaan yang meningkatkan kontak antara tetesan minyak/polimer dan sel, sehingga mempercepat pelepasan komponen hidrokarbon dari matriks plastik dan memungkinkan aksi enzimatik lebih lanjut; temuan eksperimen dan pengamatan lapangan mendukung peran *Alcanivorax* baik sebagai pemecah alkana maupun sebagai komponen penting dalam komunitas plastisphere yang dapat memfasilitasi degradasi polimer yang mengandung rantai hidrokarbon (Davidov *et al.*, 2025).

Beberapa spesies *Halomonas* dilaporkan mampu mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) serta menurunkan mobilitas beberapa logam berat dalam sedimen atau air limbah yang bersifat asin/alkali. Mekanisme biologis yang terlibat mencakup aksi enzim reduktase (chromate reductases atau nitroreductase-like enzim) yang secara elektrokimia mereduksi Cr(VI) menjadi bentuk Cr(III) kurang larut; proses ini seringkali berlangsung bersamaan dengan biosorpsi pada dinding sel (gugus fungsi pada polisakarida/ protein dinding) dan pembentukan presipitat hidroksida logam, sehingga mengurangi kelarutan dan ketersediaan hayati logam tersebut. Kemampuan ini menjadi sangat relevan pada kondisi halo-alkalinitas karena *Halomonas* mempertahankan aktivitas enzimatiknya pada salinitas dan pH tinggi — kondisi di mana banyak bakteri non-halofilik gagal — sehingga *Halomonas* menjadi kandidat unggul untuk bioremediasi limbah penyamakan dan industri yang bersifat saline/alkali. Selain reduksi langsung, studi konsorsium menunjukkan sinergi antara *Halomonas* dan mikroba lain yang mengakselerasi penurunan mobilitas logam melalui kombinasi reduksi kimia, kompleksasi organik, dan pengendapan (Alabssawy & Hashem 2024).

Pseudomonas aeruginosa berfungsi sebagai platform bioremediasi yang fleksibel karena memiliki jaringan genetik dan enzimatik luas yang memungkinkan oksidasi dan fungsionalisasi berbagai senyawa organik (BTEX, fenol, PAHs, residu minyak). Mekanisme utamanya meliputi ekspresi mono- dan di-oxygenase yang menambahkan gugus hidroksil atau membentuk diol pada inti aromatik, diikuti oleh reaksi pembelahan cincin (ring-fission) melalui enzim dioxygenase yang menghasilkan metabolit seperti katekol; metabolit ini kemudian diproses melalui jalur orto atau meta menuju produk akhir non-toksik yang masuk ke siklus metabolik dasar. Selain itu, *P. aeruginosa* menghasilkan biosurfaktan (rhamnolipid) yang meningkatkan ketersediaan substrat hidrofobik dengan cara mengemulsifikasi minyak sehingga memperbesar permukaan yang dapat dicerna enzim. Studi eksperimental dan transcriptomik menunjukkan bahwa keberadaan co-substrat aromatik (misal naftalena) dan kondisi nutrisi memodulasi ekspresi gen-gen kunci degradasi, sehingga kemampuan remediasi *P. aeruginosa* dapat dioptimalkan melalui pengaturan kondisi lingkungan atau melalui aplikasi konsorsium mikroba (Hu *et al.*, 2023).

Efektivitas bioremediasi meningkat jika menggunakan campuran beberapa jenis bakteri (konsorsium), atau kombinasi bakteri dan jamur, karena mereka dapat bekerja sama secara sinergis untuk menguraikan polutan yang kompleks. Selain itu, teknik bioaugmentasi (penambahan mikroba terpilih) dan biostimulasi (penambahan nutrisi) juga terbukti mempercepat proses pembersihan lingkungan yang tercemar. Namun, keberhasilan bioremediasi sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH, suhu, ketersediaan nutrisi, dan tingkat toksisitas polutan. Penggunaan mikroba lokal yang sudah beradaptasi dengan lingkungan setempat, serta penerapan teknologi baru seperti rekayasa genetika dan metagenomik, dapat meningkatkan efektivitas bioremediasi (Ławniczak, 2020).

Mikroba bioremediasi sangat penting untuk mengatasi pencemaran hidrokarbon dan logam berat secara ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan. Pendekatan yang menggabungkan berbagai jenis mikroba dan teknik pendukung akan memberikan hasil yang lebih optimal dalam membersihkan lingkungan dari polutan berbahaya (Hossain, 2021).

PENCEGAHAN BIOAKUMULASI TOKSIN PADA RANTAI MAKANAN

Bioakumulasi adalah proses menumpuknya zat berbahaya seperti logam berat dalam tubuh organisme, yang kemudian bisa berpindah ke tingkat lebih tinggi di rantai makanan, hingga akhirnya menumpuk pada manusia. Akumulasi ini berbahaya karena logam berat seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), atau kromium (Cr) sulit dikeluarkan dari tubuh (Nugraha *et al.*, 2021).

Penelitian di Sungai Tallo Makassar menunjukkan bahwa ikan di sungai tersebut telah mengandung logam berat Cd dan Cr. Jika ikan ini dikonsumsi terus-menerus, risiko penyakit seperti gangguan ginjal, saraf, bahkan kanker bisa meningkat. Hal serupa juga ditemukan pada kerang *Anadara sp.* di muara sungai yang sama, di mana kandungan Cd dan Cr terdeteksi cukup tinggi. Kondisi ini berbahaya karena kerang banyak dikonsumsi oleh masyarakat pesisir (Nurjhanna *et al.*, 2019).

Selain itu, mikroorganisme laut seperti mikroalga bisa dijadikan bioindikator, yaitu organisme yang dapat menunjukkan adanya pencemaran. Misalnya, *Skeletonema costatum* terbukti mampu mengakumulasi logam Pb dari perairan, sehingga kehadirannya bisa dijadikan penanda adanya pencemaran logam berat. Dengan peran ini, mikroorganisme tidak hanya menjaga ekosistem laut, tetapi juga bisa membantu manusia dalam mendeteksi pencemaran sebelum berlanjut menjadi masalah kesehatan (Liwun *et al.*, 2019).

REKAYASA GENETIKA MIKROBA UNTUK REMEDIASI YANG LEBIH CEPAT

Rekayasa genetika merupakan salah satu teknik bioteknologi yang digunakan untuk mengubah atau menambahkan susunan gen dalam suatu organisme agar memiliki sifat baru yang lebih bermanfaat. Dalam konteks bioremediasi laut, rekayasa genetika berarti memodifikasi mikroorganisme supaya lebih efektif dan cepat dalam memecah polutan seperti minyak, logam berat, maupun plastik. Jika mikroba alami hanya mengandalkan kemampuan bawaan yang kadang berjalan lambat, maka lewat rekayasa genetika peneliti dapat memperkuat gen penghasil enzim pengurai atau bahkan menambahkan gen baru agar mikroba mampu menarget polutan tertentu yang sulit diuraikan. Dengan cara ini, mikroba laut tidak hanya berperan sebagai pembersih alami, tetapi juga bisa diubah menjadi “mesin biologis” yang lebih efisien dalam menjaga kesehatan ekosistem. Prospek penelitian rekayasa genetika mikroba untuk remediasi lebih cepat dapat dipahami sebagai arah pengembangan ilmu yang berfokus pada penciptaan strain mikroba laut hasil modifikasi genetik, sehingga proses penguraian polutan dapat berlangsung lebih cepat, lebih spesifik, dan lebih sesuai dengan kebutuhan lingkungan (Sahlan *et al.*, 2022).

Seiring meningkatnya pencemaran laut akibat hidrokarbon, logam berat, dan bahkan mikroplastik, penelitian bioremediasi mulai diarahkan pada pendekatan rekayasa genetika untuk mempercepat proses pembersihan. Dari sebuah studi yang dilakukan menunjukkan bahwa bakteri laut memiliki gen dioxygenase (*nahAc*) yang berperan penting dalam pemecahan senyawa aromatik berbahaya. Analisis gen seperti ini membuka peluang untuk dimodifikasi lebih lanjut sehingga aktivitas enzim pengurai bisa ditingkatkan. Dengan kata lain, isolat mikroba laut yang

sudah terbukti punya potensi alami, dapat “dituning” lewat teknologi genetika agar bekerja lebih cepat dan efisien dalam menguraikan polutan (Sahlan *et al.*, 2022).

Dari hasil studi penelitian lain, yang dilakukan di Manado ditemukan bakteri laut penghasil enzim xilanase yang aktivitasnya tinggi. Walaupun fokusnya bukan langsung pada pencemaran minyak atau logam, studi ini memperlihatkan bahwa isolat laut menyimpan banyak enzim aktif yang bisa menjadi target rekayasa genetika. Dengan memodifikasi gen penghasil enzim, laju degradasi senyawa kompleks dapat ditingkatkan dan diarahkan sesuai kebutuhan lingkungan (Fawzya *et al.*, 2023).

Sementara itu, penelitian di Jepara oleh tim dari Universitas Diponegoro (2022) berhasil mengidentifikasi bakteri laut asosiasi karang yang sanggup mendegradasi plastik polycaprolactone. Temuan ini memperlihatkan kalau mikroba punya kemampuan alami memecah polimer, yang bisa dijadikan dasar pengembangan teknik rekayasa gen untuk menghadapi masalah besar pencemaran plastik di laut. Jika kemampuan ini ditingkatkan secara genetik, maka proses penguraian plastik yang biasanya memakan waktu lama bisa berlangsung lebih cepat (Jannah *et al.*, 2022).

Secara keseluruhan, prospek penelitian rekayasa genetika mikroba laut sangat menjanjikan. Data genetik yang sudah berhasil diidentifikasi dari berbagai isolat memberi dasar kuat bagi pengembangan strain unggul yang lebih tangguh, lebih cepat, dan lebih spesifik dalam mendegradasi polutan. Namun, setiap upaya rekayasa harus tetap memperhatikan keamanan lingkungan, misalnya dengan menguji strain di mikrokosmos dulu sebelum diaplikasikan di laut terbuka. Dengan pendekatan ini, mikroorganisme laut bukan hanya berperan sebagai bioindikator, tetapi juga bisa menjadi “mesin biologis” yang dirancang khusus untuk menjaga kesehatan ekosistem pesisir.

RELEVANSI DENGAN BIDANG FARMASI: LINGKUNGAN SEHAT MENDUKUNG KETERSEDIAAN BAHAN BAKU OBAT

Selain berdampak pada kesehatan masyarakat, pencemaran laut dan bioakumulasi juga memiliki kaitan erat dengan dunia farmasi. Banyak obat yang dikembangkan berasal dari metabolit bioaktif yang diproduksi oleh tumbuhan maupun mikroorganisme laut. Jika lingkungan tercemar logam berat, maka kualitas senyawa bioaktif tersebut dapat menurun (Putra & Sari, 2020).

Contoh yang mirip ditemukan pada tanaman obat darat. Penelitian di Samarinda menunjukkan bahwa daun sirsak dan beluntas yang biasa dipakai sebagai obat tradisional ternyata mengandung logam Pb dan Cd meskipun kadarnya masih di bawah batas aman. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas obat tradisional pun sangat dipengaruhi kondisi lingkungan. Dengan kata lain, pencemaran tidak hanya berdampak pada pangan, tetapi juga pada bahan baku obat (Gama, 2017).

Mikroorganisme laut juga berperan penting dalam menjaga lingkungan agar tetap mendukung ketersediaan sumber obat. Penelitian menemukan bahwa *Skeletonema* sp. mampu menyerap logam Cd dari perairan, sehingga dapat digunakan sebagai agen bioremediasi. Dengan demikian, menjaga kebersihan lingkungan laut tidak hanya melindungi kesehatan manusia dari bioakumulasi, tetapi juga memastikan keberlanjutan bahan baku farmasi yang berkualitas (Fahmi, 2020).

KESIMPULAN

Mikroorganisme laut memiliki potensi besar dalam upaya pengendalian pencemaran laut. Peran ganda sebagai bioindikator dan agen bioremediasi menjadikan mikroorganisme tidak hanya mampu mendeteksi adanya polusi secara cepat dan akurat, tetapi juga berkontribusi langsung dalam pemulihan ekosistem. Plankton, bivalvia, dan bakteri indikator terbukti sensitif terhadap perubahan lingkungan, sedangkan mikroba bioremediasi efektif dalam mendegradasi hidrokarbon, mengikat logam berat, serta berpotensi menguraikan plastik. Upaya ini tidak hanya menjaga kualitas ekosistem laut, tetapi juga mencegah bioakumulasi toksin pada rantai makanan yang berdampak pada kesehatan manusia. Lebih jauh, prospek penelitian berbasis rekayasa

genetika membuka peluang pengembangan mikroorganisme laut sebagai agen remediasi yang lebih efisien, spesifik, dan berkelanjutan. Dengan demikian, mikroorganisme laut dapat dipandang sebagai solusi ilmiah yang ramah lingkungan sekaligus strategis bagi keberlanjutan sumber daya hayati dan farmasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alabssawy, A. N., & Hashem, A. H. (2024). Bioremediation of hazardous heavy metals by marine microorganisms: a recent review. *Archives of microbiology*, 206(3), 103. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03793-5>
- Areco, M. M., Salomone, V. N., & Afonso, M. D. S. (2021). *Ulva lactuca*: A bioindicator for anthropogenic contamination and its environmental remediation capacity. *Marine Environmental Research*, 172, 105485. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105485>
- Bourdonnais, E., Le Bris, C., Brauge, T., & Midelet, G. (2024). Monitoring indicator genes to assess antimicrobial resistance contamination in phytoplankton and zooplankton communities from the English Channel and the North Sea. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1313056. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1313056>
- Chahouri, A., Yacoubi, B., Moukrim, A., & Banaoui, A. (2022). Integration assay of bacteriological risks in marine environment using *salmonella* spp and multimarker response in the bivalve *Donax trunculus*: Novel biomonitoring approach. *Chemosphere*, 295, 133914. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133914>
- Chandel, P., Mahajan, D., Thakur, K., Kumar, R., Kumar, S., Brar, B., Sharma, D., & Sharma, A. (2023). A review on plankton as a bioindicator: A promising tool for monitoring water quality. *World Water Policy*, 9(3), 1–15. <https://doi.org/10.1002/wwp2.12197>
- Davidov, K., Itzhari, S., Kartha, A., Orr, G., Lang, Z., Navon-Venezia, S., & Oren, M. (2025). Rapid Colonisation of Plastic Surfaces by Marine *Alcanivorax* Bacteria Is Flagellum-Dependent and Influenced by Polymer Type and Photo-Weathering State. *Environmental microbiology*, 27(5), e70102. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.70102>
- Dell'Anno, F., Van Zyl, L., Trindade, M., Buschi, E., Cannavacciuolo, A., Pepi, M., Sansone, C., Brunet, C., Ianora, A., De Pascale, D., Golyshin, P., Dell'Anno, A., & Rastelli, E. (2022). Microbiome enrichment from contaminated marine sediments unveils novel bacterial strains for petroleum hydrocarbon and heavy metal bioremediation.. *Environmental pollution*, 120772 . <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120772>.
- Fahmi, A. A. F. (2020). Potensi *Skeletonema* sp. dalam Bioremediasi Kadmium (Cd) di Perairan. Skripsi. Universitas Brawijaya.
- Fawzya, Y. N., Prima, R. E., Mangunwardoyo, W., Munifah, I., & Patantis, G. (2023). Produksi dan Karakterisasi Xilanase dari Isolat Bakteri M-13.2a Asal Air Laut Manado. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*.
- Gama, S. I. (2017). Analisis logam berat dalam daun sirsak (*Annona muricata*) dan daun beluntas (*Pluchea indica*). *Jurnal Sains Kesehatan*, Universitas Mulawarman.
- Hossain, M., Akter, M., Sohan, M., Sultana, N., Reza, M., & Hoque, K. (2021). Bioremediation potential of hydrocarbon degrading bacteria: isolation, characterization, and assessment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 211 - 216. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.069>.
- Hu, F., Wang, P., Li, Y., Ling, J., Ruan, Y., Yu, J., & Zhang, L. (2023). Bioremediation of environmental organic pollutants by *Pseudomonas aeruginosa*: Mechanisms, methods and challenges. *Environmental Research*, 239, 117211. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117211>
- Husamah, H., & Rahardjanto, A. (2019). Bioindikator (Teori dan aplikasi dalam biomonitoring).
- Jannah, S. N., Nurhayati, N., & Zainuri, M. (2022). Kemampuan Degradasi Mikroplastik Polycaprolactone oleh Bakteri Asosiasi Karang Keras di Pantai Kartini Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*.

- Ławniczak, Ł., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A., Heipieper, H., & Chrzanowski, Ł. (2020). Microbial Degradation of Hydrocarbons—Basic Principles for Bioremediation: A Review. *Molecules*, 25. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>.
- Liwun, R. R., Purnomo, T., & Wulandari, D. (2019). Potensi *Skeletonema costatum* sebagai fikoremediator logam berat timbal (Pb). *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 24(1), 10–18.
- Microbiota characterization of the green mussel *Perna viridis* at the tissue scale: relationships between bacterial communities and environmental parameter Jilid 15. (2024) |<https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1366305>
- Nguyen Thanh Kim, H., Duong, VH, Chu, TT, Pham-Thi, TX, Nguyen, XQ, Van Vu, S., ... & Kovács, T. (2025). Kerang sebagai Bioindikator untuk Deteksi Cepat Fluktuasi Logam Berat di Perairan Pesisir Laut: Studi Kasus Pemantauan dan Penilaian Bioakumulasi Musiman *Perna viridis* dari Pesisir Teluk Tonkin, Hai Phong, Vietnam. *Water*, 17 (17), 2552.
- Nugraha, R. A., Siregar, R. T., & Marzuki, M. (2021). Dampak bioakumulasi logam berat terhadap kesehatan manusia. *Jurnal Lingkungan dan Kesehatan*, 13(2), 55–63.
- Nurjhan, N., Asriani, A., & Suriah, S. (2019). Bioakumulasi logam berat kadmium (Cd) dan kromium (Cr) dalam air dan ikan di Sungai Tallo Makassar. *Journal Work of Public Health*, 1(1), 15–23.
- Putra, A. R., & Sari, R. (2020). Mikroorganisme laut sebagai sumber metabolit bioaktif untuk pengembangan obat. *Jurnal Farmasi Sains dan Praktis*, 6(2), 77–85.
- Rahman, A., Nur, M. S., & Wibowo, H. (2021). Bioakumulasi logam berat Cr dan Cd pada sedimen dan kerang (*Anadara* sp.) di Muara Sungai Tallo Kota Makassar. *Jurnal Biologi Makassar*, 6(3), 122–130.
- Sahlan, M., Yuliani, H., Hermansyah, H., & Wijnarko, A. (2022). The Initial Dioxigenase Gene Sequences Analysis of Marine Bacteria Strain M128. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*.
- Saleh, I., Syamsir, S., Pramaningsih, V., & Hansen, H. (2021). The use of green mussel as bioindicator of heavy metal pollution in Indonesia: a review. *Environmental analysis, health and toxicology*, 36(4), e2021026.
- Teiba, I. I., Hassan, S., Khurshid, Z., Bhat, S., Kumar, V., Ameen, F., & Ganai, B. (2022). Marine bacteria and omic approaches: A novel and potential repository for bioremediation assessment. *Journal of Applied Microbiology*, 133(1), 1-17. <https://doi.org/10.1111/jam.15538>