

PEMANFAATAN MIKROORGANISME INDIGENOUS PADA SUMUR AIR ASIN DALAM DETOKSIFIKASI TIMBAL (PB) UNTUK BUDIDAYA AIR PAYAU

Utilization of Indigenous Microorganisms in Saltwater Wells In Lead (Pb) Detoxification for Brackish Water Cultivation

Atika Marisa Halim*, Putri Nurhanida Rizky, Kartika Primasari, Annisa' Bias Cahyanurani, Asep Akmal Aonullah, Teguh Harijono, Nasuki, Ahmad Aditya Sasmita

Program Studi Teknik Budidaya Perikanan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo

Jl. Raya Buncitan KP.1 Sedati, Sidoarjo, Jawa timur, 61253

Email: atikamarisa@gmail.com

ABSTRAK

Pencemaran logam berat, khususnya timbal (Pb), pada sumber air asin untuk budidaya air payau dapat menurunkan kualitas media dan mengancam keberlangsungan organisme budidaya. Metode penanganan berbasis fisik dan kimia sering kurang efisien serta berpotensi menimbulkan dampak lanjutan, sehingga diperlukan alternatif yang lebih ramah lingkungan. Mikroorganisme indigenous menjadi salah satu opsi bioremediasi yang menjanjikan karena mampu beradaptasi dengan kondisi lokal dan berpotensi mereduksi logam berat secara alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mikroorganisme indigenous yang berpotensi sebagai agen bioremediasi alami dalam menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) pada sumur air asin yang digunakan untuk budidaya air payau. Sampel air dan sedimen diambil dari sumur Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo, kemudian dilakukan isolasi bakteri, kultivasi, serta uji resistensi terhadap Pb dengan dosis 0,5; 1 dan 1,5 ppm dengan metode difusi cakram. Hasil analisis menunjukkan bahwa parameter kualitas air pada media air sumur Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo seperti suhu, pH, dan BOD belum sepenuhnya memenuhi baku mutu air laut, namun masih memungkinkan untuk digunakan pada kegiatan budidaya air payau dengan adanya perlakuan persiapan media terlebih dahulu. Kandungan logam berat pada sedimen lebih tinggi dibandingkan pada air, dengan urutan konsentrasi Cu, Pb, Cd, Cr dan Zn. Isolat bakteri yang diidentifikasi memiliki karakter gram negatif berbentuk batang (basil) dan menunjukkan kemampuan reduksi terhadap logam Pb. Berdasarkan hasil uji biokimia, isolat tersebut teridentifikasi sebagai *Marinobacter* sp. Yaitu bakteri laut halotoleran yang mampu bertahan pada lingkungan bersalinitas tinggi. Uji resistensi menunjukkan bahwa *Marinobacter* sp. memiliki kemampuan reduksi Pb yang tergolong sedang (zona hambat 10–11 mm) pada konsentrasi 0,5–1,5 ppm. Hasil ini menunjukkan bahwa mikroorganisme indigenous memiliki potensi sebagai agen bioremediasi ramah lingkungan untuk menurunkan kadar logam berat di air asin, sehingga dapat meningkatkan kualitas media budidaya air payau secara berkelanjutan.

Kata kunci: Air payau ; Bioremediasi; *Marinobacter* sp.; Logam Berat

ABSTRACT

*Heavy metal contamination, particularly lead (Pb), in saline water sources used for brackish-water aquaculture can degrade water quality and threaten the sustainability of cultured organisms. Physical and chemical treatment methods are often inefficient and may generate secondary environmental impacts, thus highlighting the need for more environmentally friendly alternatives. Indigenous microorganisms offer a promising bioremediation approach because they are naturally adapted to local conditions and possess the potential to reduce heavy metal concentrations. This study aims to identify indigenous microorganisms with potential as natural bioremediation agents to reduce lead (Pb) concentrations in saltwater wells used for brackish water aquaculture. Water and sediment samples were collected from the well of the Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo, followed by isolation, cultivation, and resistance tests against Pb at concentrations of 0.5, 1, and 1.5 ppm using the disc diffusion method. The analysis showed that water quality parameters such as temperature, pH, and BOD did not fully meet seawater quality standards but were still suitable for brackish water aquaculture activities. The concentration of heavy metals in sediment was higher than in water, with the order of abundance being Cu, Pb, Cd, Cr, and Zn. The isolated bacteria were identified as Gram-negative rod-shaped (bacillus) and showed a reduction ability toward Pb. Based on biochemical tests, the isolate was identified as *Marinobacter* sp., a halotolerant marine bacterium capable of surviving in high-salinity environments. Resistance testing showed that *Marinobacter* sp. exhibited moderate Pb reduction ability (inhibition zone 10–11 mm) at concentrations of 0.5–1.5 ppm. These findings indicate that indigenous microorganisms have potential as environmentally friendly bioremediation agents to reduce heavy metal concentrations in saline water, thereby improving the quality of brackish water culture media sustainably.*

Keywords: Bioremediation ; Brackish Water; Heavy Metal; *Marinobacter* sp.

PENDAHULUAN

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, klasifikasi mutu air dibedakan menjadi empat kelas, diantaranya baku mutu air minum, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut; Kelas dua, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air; Kelas tiga, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut; dan kelas empat, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanaman dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut. Polusi air dapat disebabkan oleh dua jenis polutan, seperti bahan yang menyebabkan eutrofikasi dan bahan beracun yang menyebabkan kerusakan pada organisme air (Pratiwi, 2020)

Perkembangan industri yang tidak memperhatikan regulasi pembuangan limbah dapat menyebabkan pencemaran lingkungan (Ouyang *et al.*, 2020). Selain itu, limbah seperti air bekas mandi, cucian, limbah dapur, serta sampah organik dan anorganik yang dibuang sembarangan dapat meresap ke dalam tanah dan mencapai sumur, terutama jika jarak antara sumber limbah dan sumur terlalu dekat atau sistem pengelolaan limbah tidak memadai (Beiras, 2018). Air sumur yang tercemar limbah rumah tangga tidak layak dikonsumsi, tidak aman untuk keperluan domestik, pertanian, atau perikanan. Logam berat sebagai salah satu buangan dari proses industri bermuara di daerah pesisir pantai. Logam berat dapat mengendap di dasar air dan mempengaruhi biota air. Keberadaan logam berat di perairan dapat terakumulasi dalam ikan demersal dan dapat membahayakan manusia jika dikonsumsi (Anwar *et al.*, 2022). Akumulasi ini tidak hanya memengaruhi stabilitas ekosistem pesisir, tetapi juga menjadi sumber kontaminan jangka panjang yang dapat kembali terdispersi ke kolom air dan mengancam organisme akuatik. Sedimen yang tercemar kemudian menjadi media akumulasi bagi biota demersal, sehingga meningkatkan risiko biomagnifikasi di sepanjang rantai makanan. Kondisi ini menjadikan pencemaran logam berat di perairan pesisir dan sedimen sebagai isu kritis yang memerlukan pendekatan penanganan efektif dan berkelanjutan dalam berbagai penelitian terkait kualitas lingkungan perairan.

Logam berat pada perairan dapat mengancam kehidupan biota maupun tumbuhan dan manusia yang bergantung pada sumber air tersebut. Logam berat memiliki sifat akumulatif di lingkungan (Briffa *et al.*, 2020). Keberadaan Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) yang menumpuk pada air dan sedimen akan masuk ke dalam kehidupan organisme di dalamnya, logam berat pada konsentrasi tertentu akan terakumulasi ke dalam air, biota, serta sedimen pada perairan tersebut dan dapat menimbulkan efek toksik terhadap organisme di dalamnya. Pencemaran logam berat, terutama timbal (Pb), menjadi salah satu tantangan utama dalam pengelolaan kualitas air, termasuk pada ekosistem air payau yang digunakan untuk keperluan budidaya. Air sumur asin (air tanah yang mengandung salinitas tinggi) sering dimanfaatkan oleh masyarakat pesisir sebagai sumber utama untuk tambak

atau akuakultur, khususnya di wilayah dengan keterbatasan air tawar (Anwar *et al.*, 2022). Namun, kegiatan industri, limbah domestik, dan penggunaan bahan kimia pertanian dapat menyebabkan akumulasi logam berat seperti Pb dalam air tanah. Timbal bersifat toksik, tidak dapat terurai secara alami, dan dapat terakumulasi dalam tubuh organisme akuatik, sehingga membahayakan kesehatan manusia dan mengganggu produktivitas budidaya (Musallamah *et al.*, 2022).

Logam berat tidak dapat diurai secara biologis, sehingga penguraian dan penghilangan logam berat tidak semudah penguraian limbah organik. Namun, metode fisika dan kimia dapat menguraikan dan mereduksi logam berat melalui pertukaran ion, presipitasi, koagulasi, osmosis terbalik, dan adsorpsi. Meskipun semua teknik yang disebutkan tersebut cukup efektif, pengolahan limbah industri menggunakan teknik-teknik ini akan merugikan karena biaya yang tinggi, konsumsi energi yang tinggi, dan kebutuhan bahan kimia yang signifikan (Elawati *et al.*, 2024). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, salah satunya melalui pemanfaatan mikroorganisme indigenous sebagai agen bioremediasi alami untuk mereduksi kandungan logam berat di lingkungan perairan. Sebagian besar mikroorganisme dapat mentoleransi logam berat pada konsentrasi tinggi dan memainkan peran penting dalam pemulihan biologis tanah. Mikroorganisme lokal yang diisolasi dalam kondisi yang tidak menguntungkan di lokasi industri dapat digunakan sebagai agen bioremediasi (Singh & Hiranmai, 2021).

Di tengah keterbatasan solusi konvensional seperti filtrasi kimia atau pengolahan fisik yang memerlukan biaya tinggi dan infrastruktur memadai, pendekatan bioremediasi muncul sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu metode bioremediasi yang menjanjikan adalah pemanfaatan mikroorganisme indigenous yakni mikroba asli dari lingkungan setempat yang memiliki kemampuan alami dalam mentoleransi dan memobilisasi logam berat seperti Pb melalui proses biosorpsi, bioakumulasi, atau biopresipitasi (Alabssawy & Hashem, 2024). Penggunaan mikroorganisme indigenous memberikan keunggulan adaptif, karena mikroba tersebut telah terbiasa hidup dalam kondisi lingkungan lokal, termasuk tingkat salinitas tinggi pada air asin. Dengan demikian, potensi mereka dalam proses detoksifikasi logam berat dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kualitas air budidaya, sekaligus meminimalkan risiko terhadap organisme budidaya dan kesehatan konsumen. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh data ilmiah mengenai efektivitas mikroorganisme indigenous dalam mereduksi logam berat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis mikroorganisme indigenous, memperoleh data ilmiah mengenai efektivitasnya dalam mereduksi kadar timbal pada air dan sedimen sumur, serta mengetahui kontribusinya dalam mendukung sistem budidaya air payau yang lebih aman dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu

Penelitian ini dilakukan di Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo dan Laboratorium Kesehatan Ikan dan

Lingkungan, Pasuruan serta Unit Layanan Pengujian, Universitas Airlangga (UNAIR), Surabaya pada Bulan Agustus hingga November 2025.

Pengambilan Sample Air dan Sedimen

Sampel air dan sedimen padatan lumpur diambil secara aseptis menggunakan alat yang telah disterilkan guna memastikan bahwa isolat bakteri yang diperoleh merupakan mikroorganisme indigenous tanpa adanya kontaminasi eksternal. Sampel air dan sedimen dimasukkan dan disimpan ke dalam Botol steril (botol Schott steril) untuk dapat digunakan uji lanjutan. Metode pengambilan sampel dilakukan pada kedalam ± 300 cm dari permukaan air sumur untuk mendapatkan isolat bakteri *indigenous* agen bioremediasi limbah Pb. Kedalaman yang dipilih tersebut cenderung stabil, pada kedalaman tersebut, aktifitas fisik dari luar relatif minimal. Sedangkan *sample* sedimen diambil dengan melakukan penyedotan dasar sumur. Selanjutnya, sampel air dan sedimen dimasukkan ke dalam botol schott *sample* untuk digunakan uji lanjutan.

Kultivasi Bakteri

Larutan NaCl (0,85%) sebanyak 1 mL diencerkan dalam 100 mL akuades sebagai stok larutan fisiologis. *Sample* air diletakkan pada tabung reaksi dan diencerkan dengan NaCl fisiologis menggunakan vortex. *Sample* sedimen diambil sebanyak 1 gram dan dilarutkan dalam larutan fisiologis sebanyak 9 mL. Selanjutnya membuat pengenceran berseri hingga 10^6 pada tabung lain yang telah berisi 9 mL larutan fisiologis dengan mengambil 1 mL pada pengenceran sebelumnya. Kemudian, 1 mL biakan dipindahkan dari tabung pengencer ke media Sea Water Nutrient Agar (SWNA) dengan metode *spread plate* dan kemudian diratakan dengan menggunakan kaca L. Selanjutnya, biakan tersebut diinkubasi pada suhu 37 °C selama 1 x 24 jam. Setelah terlihat bakteri yang tumbuh, dilihat bentuk koloni bakteri yang berbeda dan diambil *single* koloni, kemudian di isolasi pada media NA baru. Isolat yang mampu tumbuh pada media NA ditumbuhkan kembali pada media NA yang telah diperkaya Pb (NO_3)₂ sebanyak 5 ppm. Isolat diperbanyak dalam media agar miring dan cawan petri untuk uji morfologi. (Shah *et al.*, 2025).

Uji Resistensi Logam Berat (Pb) dengan Metode Disc Diffusion

Uji ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kemampuan isolat bakteri dalam mentoleransi dan mereduksi logam berat Pb melalui pengamatan zona hambat yang terbentuk di sekitar cakram logam. Semakin kecil zona hambat yang muncul, semakin tinggi tingkat resistensi bakteri terhadap Pb. Dengan demikian, metode ini digunakan untuk menilai potensi bakteri sebagai agen bioremediasi dalam lingkungan yang tercemar timbal.

Identifikasi ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan dari masing-masing isolat yang ditemukan serta juga dapat digunakan sebagai dasar untuk proses identifikasi genus maupun spesies bakteri dengan uji lanjut (uji biokimia maupun uji molekuler) (Wijayanti, 2017).

Pengamatan mikroskopis dilakukan secara langsung dengan cara mengidentifikasi morfologi koloni bakteri seperti bentuk, bentuk tepian, warna, elevasi, dan sifat koloni apabila diamati dibawah cahaya (mengkilap atau suram). Karakteristik

mikroskopik diketahui dengan cara mengidentifikasi bentuk bakteri yang ditemukan serta pewarnaan gram. Pengamatan hasil pewarnaan dilakukan pada perbesaran 1000x menggunakan mikroskop dengan ditetesi terlebih dahulu dengan emersi untuk memperjelas pengamatan. Pada isolat bakteri terpilih (Isolat resisten) atau bakteri yang memiliki daya reduksi logam lebih baik juga dilakukan pengujian mikroskopik meliputi pewarnaan endospora, uji motilitas dan uji biokimia. Uji mikroskopik tambahan dan uji biokimia (uji katalase dan uji oksidase) dilakukan untuk mengetahui genus bakteri yang mampu mereduksi logam (Prayogo *et al.*, 2018).

Uji Resistensi Logam Berat

Uji resistensi logam berat dilakukan dengan metode cakram (*disc diffusion*) menggunakan kertas cakram yang direndam larutan logam Pb dengan konsentrasi 0,5, 1, 1,5 ppm. Sebelum dilakukan uji resistensi, dibuat terlebih dahulu suspensi bakteri yang akan di uji yaitu dengan cara bakteri disolusi terlebih dahulu di media NA yang terkandung logam Pb 5 ppm selanjutnya diinkubasi selama 24 jam. Kemudian bakteri tersebut diambil sebanyak 1 - 2 ose dan disuspensi kedalam larutan NaCl 0,9 % sampai diperoleh kekeruhan sesuai dengan standar 0,5 *Mc Farland* atau sebanding dengan jumlah bakteri 10^8 (CFU/mL (Chakraborty & Das, 2014).

Selanjutnya dilakukan uji resistensi dengan menggunakan media *Muller Histon Agar* (MHA), dituangkan sebanyak 20 mL media kedalam cawan petri kemudian dibiarkan memadat, selanjutnya dimasukkan suspensi bakteri sebanyak 0,1 mL kemudian disebarluaskan menggunakan batang L steril agar suspensi tersebut merata, kemudian didiamkan selama 10-20 menit agar suspensi tersebut menyerap pada media, selanjutnya diletakkan kertas cakram yang telah direndam Pb dengan berbagai macam konsentrasi (0,5; 1 dan 1,5 ppm) di atas media yang telah berisi bakteri dengan menggunakan pinset, kemudian diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37 °C, dan diukur zona bening menggunakan *antibiotic zone scale* dengan satuan millimeter (mm), pengujian ini dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali.

Resistensi logam Pb dapat diamati dengan zona hambat disekitar cakram tersebut ada atau tidaknya ditumbuhinya mikroba, jika semakin kecil zona bening disekitar cakram tersebut maka bakteri tersebut makin tahan terhadap cengkraman logam. Pengukuran zona dicatat sebagai jarak dari tepi zona bening ke tepi kertas cakram. Zona hambat yang dihasilkan bakteri dikatakan resisten terhadap logam berat jika pengukuran zona hambat sebesar ≤ 1 mm (Fadl *et al.*, 2017). Pengamatan dan perhitungan zona hambat diukur secara vertikal dan horizontal, kemudian hasil yang diperoleh dibagi dua untuk mendapatkan rata-rata seperti pada rumus yang telah ditentukan.

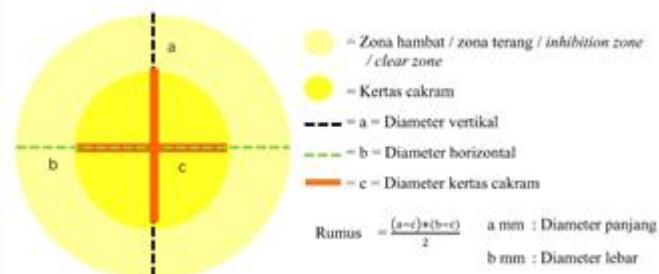


Figure 1. Simulation of How to Measure Bacterial Inhibition Zones and Heavy Metal Pb

Gambar 1. Simulasi Cara Pengukuran Zona Hambat Bakteri dan Logam Berat Pb

Pengukuran Zona Hambat :

Setelah dilakukan inkubasi selama 24 jam, kemudian dilakukan pengukuran diameter zona hambat di sekitar kertas cakram pada masing-masing kelompok penelitian dengan menggunakan rasio perbandingan antara besar diameter terluar zona hambat dengan diameter kertas cakram menggunakan *antibiotic zone scale*. Pengukuran dilakukan dengan menghitung diameter rata-rata zona hambat dengan rumus hasil pengurangan diameter vertikal (a) dan diameter kertas saring (c) dijumlahkan dengan hasil pengurangan diameter horizontal (b) dan diameter kertas saring (c) lalu dibagi dua. Dari hasil perhitungan tersebut, nilai yang didapatkan akan dimasukkan ke dalam kriteria klasifikasi efektivitas suatu zat antibakteri Menurut *Greenwood* sebagai berikut (Richter *et al.*, 2017).

Diameter 10 mm	:	daya hambat ada (bakteri resisten)
Diameter 11-15 mm	:	daya hambat sedang (bakteri cukup resisten/intermediet)
Diameter 16 - >20 mm	:	daya hambat sangat kuat (sensitif)

Analisis Data

Penelitian ini dianalisis dengan deskriptif kualitatif yaitu data hasil penelitian yang meliputi karakteristik bakteri secara mikroskopis dianalisa secara deskriptif. Hasil isolasi bakteri menggunakan metode *Spread Plate* dan data uji melihat kemampuan bakteri dalam resistensi logam timbal (Pb) dengan menggunakan metode cakram (*disc diffusion*) dianalisis menggunakan rancangan acak lengkap dengan tiga kali pengulangan. Data hasil perbedaan zona hambat dari mikroba indigenus dilanjutkan dengan analisis statistik menggunakan uji korelasi keragaman pada tingkat kepercayaan 95%. Apabila terdapat pengaruh signifikan, maka dilanjutkan dengan uji nyata beda kecil dengan bantuan SPSS 19.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Kualitas Air dan Sedimen

Lingkungan akan sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan bakteri. Adapun kondisi lingkungan dari sumur air asin di Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo disajikan pada Tabel 1.

Table 1. Environmental Parameters of the Water Well at the Sidoarjo KP Polytechnic

Tabel 1. Parameter Lingkungan Air Sumur Politeknik KP Sidoarjo

No	Parameter	Satuan	Hasil		(mg/L) **
			Penelitian	SNI 7246:2006	
1	Suhu	°C	33	28 – 30	
2	Salinitas	ppt	35	10 – 40	
3	pH	-	7.05	7.5 – 8.5	
4	BOD, minimal	ppm (mg/L)	20	3.0	

Suhu air sumur melebihi kisaran standar SNI. Suhu yang terlalu tinggi dapat mengurangi kadar oksigen terlarut dan memengaruhi metabolisme organisme akuatik, sehingga kurang ideal bagi kegiatan budidaya. Tingginya suhu disebabkan oleh kondisi cuaca yang cukup panas saat pengukuran di lapangan, kondisi sumur yang terbuka juga

sangat memungkinkan akan menerima panas matahari secara langsung, selain itu sumur masih dalam kondisi dangkal, sehingga stabilitas suhu belum cukup tejaga. Nilai salinitas masih berada dalam kisaran standar. Artinya, kondisi salinitas air sesuai untuk kegiatan budidaya udang, khususnya jenis *Litopenaeus vannamei* yang toleran terhadap salinitas 15 - 35 ppt. Nilai pH sedikit lebih rendah dari standar SNI, menunjukkan kondisi air agak asam. pH di bawah standar dapat mengganggu keseimbangan ionik dan kesehatan organisme budidaya. Diperlukan penyesuaian dengan penambahan kapur (CaCO_3 atau dolomit) untuk menstabilkan pH. Nilai BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) jauh lebih tinggi dari standar. Hal ini menandakan adanya banyak bahan organik di dalam air sumur yang memerlukan oksigen untuk penguraian. BOD tinggi berpotensi menurunkan oksigen terlarut (DO), menurunkan kualitas air, dan menyebabkan stres atau kematian pada udang. Kemungkinan sumbernya adalah limbah organik dari sisa pakan, bahan organik tanah, atau kontaminasi limbah domestik.

Biochemical Oxygen Demand adalah jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroba di dalam air dalam kondisi aerobik untuk memecah bahan organik yang ada di dalam perairan. Jika nilai BOD pada air tinggi, maka berarti air tersebut telah tercemar oleh bahan-bahan organik. Jika kadar BOD relatif tinggi, maka mikroorganisme dalam air tersebut memerlukan oksigen terlarut dalam jumlah besar untuk menguraikan bahan organik dalam air tambak. Hal ini bisa menyebabkan kurangnya oksigen terlarut dalam air, sehingga dapat memengaruhi pertumbuhan ikan dan udang yang dipelihara di tambak tersebut (Nur *et al.*, 2022). Secara umum, air sumur Politeknik KP Sidoarjo belum memenuhi standar SNI 7246:2006 untuk beberapa parameter penting, terutama suhu, pH, dan BOD apabila digunakan secara langsung untuk budidaya komoditas air payau. Namun, salinitas dan pH masih sesuai untuk budidaya, sehingga air tersebut masih berpotensi digunakan dengan pengelolaan tambahan.

Table 2. Heavy Metal Levels in Water and Sediment of Saltwater Wells at the Sidoarjo Polytechnic

Tabel 2. Kadar Logam Berat di Air dan Sedimen Sumur Air Asin Politeknik KP Sidoarjo

No	Jenis Logam Berat	Hasil (mg/L)		(mg/L) **
		Air	Sedimen	
1	Pb	0,0040	1,21	0,008
2	Cd	0,0971	0,05	0,001
3	Cu	2,03	2,45	0,008
4	Zn	0	0,02	0,05
6	Cr	0,03	0,06	0,005

** Baku mutu berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut No. 51 Tahun 2004

Berdasarkan data hasil pada Tabel 2, kandungan logam berat yang terkandung pada sedimen sumur Politeknik KP Sidoarjo lebih banyak dibandingkan dengan sample air berurutan mulai dari Cd, Zn, Cr, Pb dan Cu. Diantara semua jenis logam berat, Tembaga (Cu) yang paling tinggi konsentrasi. Logam berat yang terkandung pada sedimen konsentrasiannya lebih tinggi, dikarenakan logam berat terakumulasi pada sedimen lumpur yang memadat, sedangkan

pada *sample* air logam berat tersuspensi pada seluruh aliran air. Sedimen lumpur di dasar sumur berfungsi sebagai penampung partikel halus yang berasal dari air tanah maupun limpasan permukaan. Partikel-partikel ini, terutama yang berukuran lempung dan mengandung bahan organik, memiliki daya adsorpsi tinggi terhadap ion logam berat. Prayoga *et al.* (2022) menambahkan bahwa logam berat dapat berikatan dengan senyawa organic membentuk senyawa kompleks yang akhirnya mengendap di dasar perairan (terakumulasi dalam sedimen). Sedimen berfungsi sebagai penampung logam yang dapat melepaskan logam ke dalam air melalui proses alami dan antropogenik. Logam berat yang terendap dalam sedimen dapat menyebabkan perubahan kualitas air dan memindahkan bahan kimia beracun ke organisme akuatik. Sedimen yang mengandung tanah liat dan partikel halus dengan luas permukaan yang lebih besar, meningkatkan penyerapan dan retensi logam.

Konsentrasi Pb dan Zn pada *sample* air menunjukkan di bawah batas baku mutu air laut ($<0,008$ dan $<0,05\text{mg/L}$ untuk air laut). Namun, kandungan Pb pada sedimen lumpur sangat tinggi (1,21 mg/L), menunjukkan akumulasi kuat di dasar sumur. Hal ini sejalan dengan sifat Pb yang sukar larut dan mudah teradsorpsi pada partikel halus serta bahan organik sedimen.

Konsentrasi Cd pada air melebihi ambang batas aman menurut World Health Organization (WHO) dan PERMENKES No. 492/Menkes/Per/IV/2010 yaitu $<0.003\text{ mg/L}$. Ini menandakan kontaminasi aktif pada air sumur, kemungkinan berasal dari aktivitas antropogenik seperti penggunaan pupuk fosfat, pestisida, atau limbah industri kecil sekitar kampus. Temuan ini mengindikasikan adanya masukan Cd dari lingkungan sekitar sumur, terutama karena Cd banyak terdapat pada pupuk fosfat sebagai kontaminan utama. Beberapa studi (Misra *et al.*, 2019; Tchounwou *et al.*, 2012) menegaskan bahwa penggunaan pupuk fosfat dalam jangka panjang dapat meningkatkan akumulasi Cd pada tanah, yang kemudian tertransportasi ke air permukaan maupun air tanah melalui infiltrasi. Keberadaan Cd di atas ambang batas berpotensi mengganggu organisme akuatik, menghambat pertumbuhan fitoplankton, dan dapat memasuki rantai makanan, sehingga menjadi isu kritis dalam kegiatan budidaya air payau. Pengujian lebih lanjut terhadap kemampuan toleransi, mekanisme detoksifikasi, serta potensi bioakumulasi mikroorganisme indigenous akan memberikan bukti empiris mengenai efektivitasnya dalam mengatasi pencemaran Cd pada lingkungan air payau. Sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk menguji kemampuan mikroorganisme indigenous dalam menghadapi paparan Cd.

Kadar tembaga (Cu) dalam sedimen yang paling tinggi (2.45 mg/L) dibandingkan di air (2.03 mg/L). Biasanya, kadar Cu di sedimen cenderung lebih tinggi karena sifat logam berat yang mudah mengendap dan mengikat bahan organik di dasar perairan, sehingga sedimen berfungsi sebagai tempat akumulasi logam tersebut. Kemampuan sedimen dalam mengakumulasi logam berat disebabkan proses akumulasi bahan yang tidak larut dalam air dan kemudian terendapkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa sedimen merupakan reservoir bagi bahan pencemar di perairan. Tingginya akumulasi logam berat pada sedimen akan mempengaruhi kualitas sedimen sehingga berpotensi menimbulkan efek merugikan terhadap organisme akuatik (Pambudiono *et al.*, 2018). Perbedaan spasial konsentrasi logam berat kemungkinan disebabkan oleh masuknya logam berat dari sungai ke sumur Politeknik KP

Sidoarjo, yang telah terkontaminasi oleh berbagai aktivitas antropogenik. Cu umumnya digunakan dalam insektisida, fungisida, bahan kuningan untuk peralatan rumah tangga, komponen mesin, serta dalam pemurnian air atau zat aditif makanan. Selain itu, limbah rumah tangga berupa limbah metabolisme dan korosi pipa dipemukiman dekat kampus biasanya juga mengandung Cu.

Konsentrasi logam berat (Pb, Cd, Cu, Zn, dan Cr) yang tinggi pada sedimen dan air sumur Politeknik KP Sidoarjo berkaitan erat dengan kecepatan arus muara sungai dan aktivitas manusia baik di darat maupun di laut. Sumur ini masih tergolong dekat dengan sumber air Sungai Cemandi dan buangan air limbah dari kegiatan di Politeknik KP Sidoarjo. Sependapat dengan Harahap (2022), pada penelitiannya konsentrasi Cu, Pb, dan Zn yang tinggi diduga berkaitan erat dengan kecepatan arus muara sungai dan aktivitas manusia. Lokasi penelitiannya masih tertutup oleh vegetasi mangrove sehingga sedikit tertekan oleh air laut yang memungkinkan logam berat banyak mengendap di dasar perairan. Namun, pada lokasi kawasan wisata yang mendapat tekanan arus yang lebih besar mengakibatkan penyebaran logam berat lebih merata daripada mengendap di dasar perairan.

Tidak terdeteksi adanya logam berat jenis Zn pada *sample* air sumur, namun terdapat 0.02 mg/L pada sedimen. Hal ini menunjukkan Zn lebih cenderung mengendap, karena pada kondisi air asin Zn membentuk senyawa karbonat atau hidroksida tidak larut, yang mengendap di dasar. Namun, dalam jangka panjang logam berat dalam sedimen berpotensi larut ke dalam air melalui proses alami dan antropogenik yang dapat menyebabkan perubahan kualitas air. Meskipun terdapat kandungan Zn dalam sedimen, namun konsentrasinya masih di bawah ambang batas baku mutu air laut untuk biota laut. Seng/Zinc (Zn) terikat pada sedimen melalui beberapa proses yang sebagian besar berkaitan dengan mekanisme adsorpsi dan presipitasi yang dipengaruhi oleh karakteristik sedimen dan kondisi lingkungan (Zakiyah, 2024). Ion Zn dalam air laut teradsorpsi kuat pada partikel sedimen halus seperti lempung dan bahan organik. Partikel-partikel ini memiliki luas permukaan yang besar dengan gugus fungsi yang mengikat seng melalui gaya tarik elektrostatik dan pembentukan kompleks. Seng dapat mengendap sebagai senyawa yang tidak larut seperti seng hidroksida, seng sulfida, dan mineral karbonat pada pH dan kondisi redoks spesifik yang terdapat dalam sedimen (Qiao *et al.*, 2021). Tingkat pengikatan seng bergantung pada faktor-faktor seperti pH (pengikatan biasanya meningkat di atas pH 7), salinitas (salinitas yang lebih rendah mendukung penyerapan), kadar oksigen (kondisi reduksi/anoksik mendukung presipitasi sulfida), dan tekstur sedimen (sedimen kaya lempung mengikat lebih banyak seng daripada yang berpasir) (Department of Health and Aged Care - Australian Government, 2024).

Morfologi Koloni dan Sel Bakteri Dominan pada Media Sample

Berdasarkan data hasil penelitian didapatkan bahwa morfologi koloni isolat bakteri pada air sumur dan sedimen memiliki ciri sel bakteri berwarna merah setelah dilakukan pewarnaan gram sehingga isolat bakteri dikelompokkan ke dalam bakteri gram negatif. Bakteri pada *sample* air sumur dan sedimen juga memiliki bentuk sel basil atau batang (Gambar 2a dan 2b).

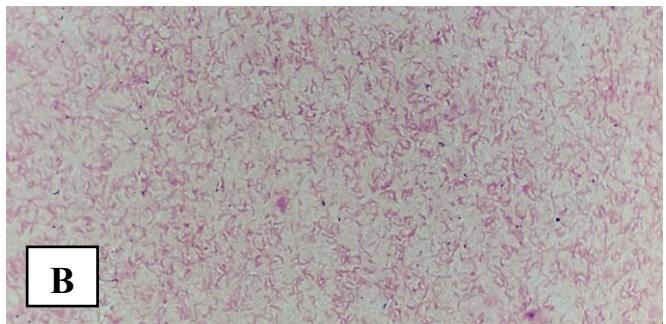
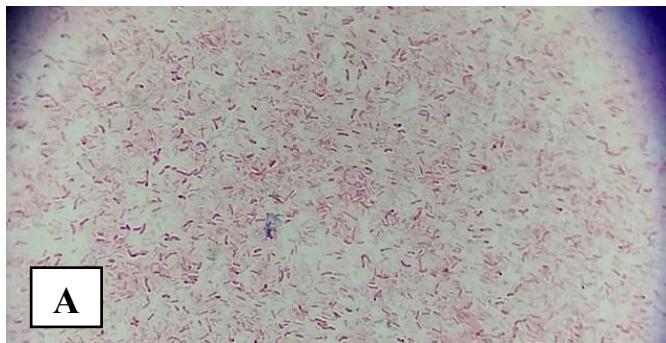


Figure 2. A) Morphology of Bacteria in Well Water, B) Morphology of Bacteria in Sediment

Gambar 2. A) Morfologi Bakteri pada Air Sumur, B) Morfologi Bakteri pada Sedimen

Karakteristik Bakteri Dominan Pada Media Sample berdasarkan Uji Biokimia

Uji biokimia bakteri merupakan salah satu uji yang digunakan untuk menunjukkan karakteristik spesies bakteri berdasarkan produksi enzim. Hasil uji biokimia bakteri dapat dilihat pada Tabel 3.

Table 3. Characteristics of Bacteria Based on Biochemical Tests
Tabel 3. Karakteristik Bakteri Berdasarkan Uji Biokimia

Kode Isolat Bakteri	Karakteristik Uji Biokimia						
	TSIA	SIM	UREASE	SITRAT	NITRAT	M R	V P
Air	A/A	-					
	G (-)	+	+	+	+	+	-
	H ₂ S (-)	+					
Sedimen	A/A	-					
	G (+)	-	+	+	+	+	-
	H ₂ S (-)	+					

Keterangan: A/A = Asam/Asam; G = Gas

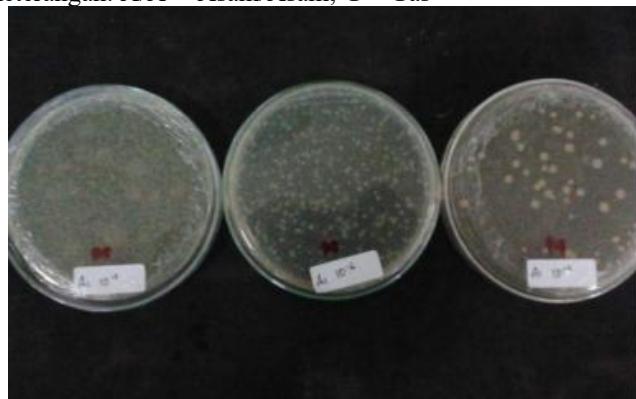


Figure 3. Bacterial Isolate Water Sample
Gambar 3. Isolat Bakteri Sample Air

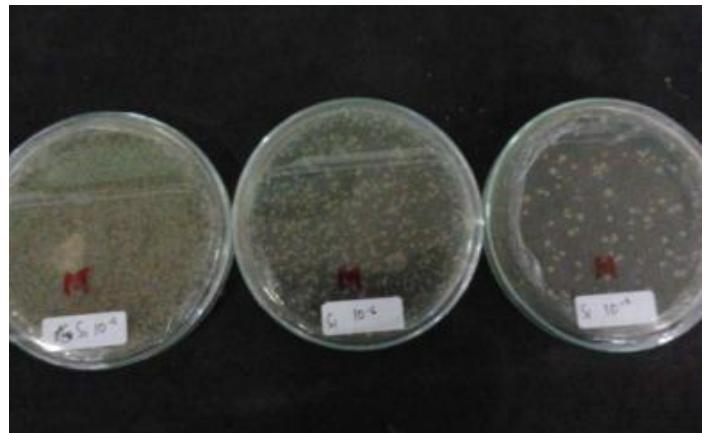


Figure 4. Sediment Sample Bacterial Isolate
Gambar 4. Isolat Bakteri Sample Sedimen

Isolat Bakteri dari Sample Air Sumur

Berdasarkan data hasil pada Tabel 5, isolat bakteri pada sample air sumur diduga mampu memfermentasi glukosa, laktosa/sukrosa ditunjukkan dengan adanya warna kuning di dasar "Butt" dan warna kuning di bagian atas "slant" pada media TSIA, namun bakteri tersebut tidak mampu membentuk gas sulfur atau H₂S yang dihidrolisis dari asam amino karena tidak terbentuk warna hitam pada media. Pada Uji SIM, dimana S = *Sulfide* (*H₂S production*), I = *Indole production* dan M = *Motility* (pergerakan) didapatkan hasil bahwa isolat bakteri pada sample air sumur tidak mampu membentuk senyawa sulfur. Namun bakteri mampu menghasilkan indole atau memecah asam amino tryptophan, ditemukan juga pergerakan pada media SIM.

Karakteristik uji urease menunjukkan bahwa bakteri mampu menghasilkan enzim urease, sehingga bakteri tersebut mampu menghidrolisis urea menjadi ammonia dan CO₂, ditantai dengan terbentuknya perubahan warna pada media urease menjadi merah muda. Sedangkan pada uji sitrat menunjukkan bahwa isolat bakteri pada sample air sumur mampu menggunakan sitrat sebagai satu-satunya sumber karbon. Pada uji nitrat, menunjukkan bahwa isolat bakteri mampu mereduksi nitrat menjadi nitrit dengan ditandai oleh perubahan kekeruhan pada media *nitrate broth*. Data hasil uji MRVP menunjukkan bahwa isolat bakteri mampu menghasilkan asam kuat dan stabil (MR+), namun tidak mampu menghasilkan asetonin (VP-).

Isolat Bakteri dari Sedimen Sumur

Berdasarkan data hasil pada Tabel 5, isolat bakteri pada sample sedimen diduga mampu memfermentasi glukosa, laktosa/sukrosa ditunjukkan dengan adanya warna kuning di dasar "Butt" dan warna kuning di bagian atas "slant" pada media TSIA, bakteri tersebut juga tidak mampu membentuk gas sulfur atau H₂S yang dihidrolisis dari asam amino ditunjukkan dengan tidak munculnya warna hitam pada media. Pada Uji SIM, dimana S = *Sulfide* (*H₂S production*), I = *Indole production* dan M = *Motility* (pergerakan) didapatkan hasil bahwa isolat bakteri pada sample sedimen tidak mampu membentuk senyawa sulfur. Bakteri juga tidak mampu menghasilkan indole atau tidak dapat memecah asam amino tryptophan, namun ditemukan adanya pergerakan pada media SIM.

Karakteristik uji urease menunjukkan bahwa bakteri mampu menghasilkan enzim urease, sehingga terbentuk senyawa amoniak yang ditandai perubahan warna pada media urease menjadi merah muda. Sedangkan pada uji sitrat menunjukkan bahwa isolat bakteri pada sample air sumur mampu menggunakan sitrat sebagai sumber karbon. Pada uji nitrat, menunjukkan bahwa isolat bakteri mampu mereduksi nitrat menjadi nitrit dengan ditandai oleh perubahan kekeruhan pada media *nitrate broth*. Data hasil uji MRVP menunjukkan bahwa isolat bakteri mampu menghasilkan asam kuat dan stabil (MR+), namun tidak mampu menghasilkan asetonin (VP-).

Berdasarkan data hasil uji biokimia isolat bakteri air dan sedimen sumur Politeknik Kelautan dan Sidoarjo, menunjukkan bahwa kedua isolat bakteri kemungkinan berasal dari kelompok bakteri fermentatif Gram-negatif, apabila mengacu pada *Bergey's Manual Determinative Bacteriology* dengan karakteristik biokimia yang telah diuji, menunjukkan secara keseluruhan, profil biokimia kedua isolat menunjukkan karakteristik bakteri laut yang bersifat gram negatif, dan non-fermentatif dengan kemampuan mereduksi sulfur serta nitrat. Kombinasi hasil sitrat positif, nitrat positif, H₂S positif, dan MR/VP negatif sangat mendukung dugaan bahwa isolat termasuk dalam bakteri laut dan hampir sama dengan genus *Marinobacter* sp. atau *Vibrio* sp. Isolat bakteri pada sedimen menunjukkan aktivitas metabolismik sedikit lebih kuat pada TSIA). Keduanya berpotensi berperan dalam degradasi bahan organik dan reduksi nitrat di lingkungan perairan. Kedua isolate bakteri baik pada sample air maupun sedimen menunjukkan hasil positif pada uji urease sehingga memungkinkan bakteri untuk beradaptasi terhadap perairan dengan kandungan nitrogen organik tinggi.

Genus *Marinobacter* awalnya ditemukan pada tahun 1992, termasuk dalam filum *Proteobacteria*, dalam kelas *Gammaproteobacteria*, ordo *Alteromonadales* dan famili *Alteromonadaceae*. Anggota kelompok ini adalah bakteri laut Gram-negatif, berbentuk batang, motil, aerobik, heterotrofik, yang telah dilaporkan sebagai pendegradasi aktif atau pemanfaat hidrokarbon dan senyawa aromatik polisiklik lainnya sebagai satu-satunya sumber karbon. Mereka umumnya diisolasi dari berbagai lingkungan salin dan hipersalin yaitu; air laut dalam dan permukaan, tanah salin yang tercemar minyak, sedimen hidrotermal, dan air limbah (Musa *et al.*, 2019). Cheng *et al.*, (2025) juga menyatakan bahwa bakteri yang termasuk dalam genus *Marinobacter* adalah mikroorganisme Gram-negatif, halotoleran, atau halofilik. Mereka banyak ditemukan di berbagai lingkungan laut dan salin. Bakteri ini memainkan peran penting dalam siklus biogeokimia zat dan energi di lautan global. Seiring dengan interaksinya yang sering dengan mikroorganisme lain yang hidup berdampingan, spesies *Marinobacter* telah mengembangkan kemampuan metabolisme yang serbaguna, seperti degradasi hidrokarbon, denitrifikasi biologis, asimilasi logam (loid), dan sintesis beragam senyawa bioaktif. Berkat kemampuan adaptasinya yang luar biasa terhadap lingkungan yang keras, terutama salinitas tinggi, dan fleksibilitas metabolismenya yang luar biasa, genus ini telah menunjukkan potensi besar dalam pengolahan air limbah, bioremediasi, dan bioproduksi. Berdasarkan uji biokimia yang mengacu pada pedoman *Bergey's Manual Determinative Bacteriology* diperoleh hasil bahwa isolat pada air dan sedimen sumur Politeknik KP Sidoarjo memiliki persentase ketepatan 88,89% dengan species *Marinobacter* sp.

Resistensi Bakteri Terhadap Logam Berat

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 6, diketahui bahwa zona hambat *Marinobacter* sp. terhadap logam berat Pb menunjukkan adanya perbedaan antar konsentrasi. Pada konsentrasi Pb 0.5 ppm dan 1 ppm, diameter zona hambat relatif sama, yaitu sekitar 10–10.2 mm, sedangkan pada konsentrasi Pb 1.5 ppm, zona hambat meningkat menjadi 10.5–11 mm. Peningkatan diameter zona hambat menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi Pb, semakin besar pengaruh toksitas logam terhadap pertumbuhan *Marinobacter* sp. Secara statistik, notasi huruf (a, b) pada Tabel 6 menunjukkan bahwa perlakuan Pb 1.5 ppm berbeda nyata dengan Pb 0.5 dan 1 ppm, yang berarti konsentrasi 1.5 ppm menghasilkan hambatan pertumbuhan paling tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kadar tersebut, logam Pb mulai menimbulkan efek toksik yang lebih kuat terhadap aktivitas fisiologis sel *Marinobacter* sp. Telah diketahui secara umum bahwa saat ini belum ada konsentrasi ion logam yang dapat diterima untuk membedakan bakteri yang resisten dan sensitif terhadap logam. Namun, konsentrasi yang digunakan dalam penelitian ini telah digunakan dalam penelitian serupa yang dilaporkan pada eubacteria (Malik & Jaiswal, 2000). Selain itu, dari hasil penelitian Azam *et al.*, (2018), yang mengujikan bakteri *E. coli* MRC11 dengan antibiotik yang dapat mempengaruhi toksitas terhadap logam berat kadmium (Cd), tembaga (Cu) dan Kromium (Cr) pada konsentrasi 5 hingga 250 ppm dengan diamter zona hambat sebesar 14 – 16 mm. Namun, apabila dimasukkan ke dalam kriteria klasifikasi efektivitas suatu zat Menurut Greenwood (Richter *et al.*, 2017), isolat *Marinobacter* sp dari air dan sedimen sumur Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo tergolong intermediet, atau memiliki reduksi logam berat khususnya Pb pada kategori sedang.

Table 1. Bacterial Inhibition Zone Against Pb Exposure
Tabel 2. Zona Hambat Bakteri Terhadap Paparan Pb

Zona Hambat (mm)	0,5 ppm	1 ppm	1,5 ppm
Ulangan 1	10 ^b	10 ^b	11 ^a
Ulangan 2	10,2 ^b	10 ^b	10,5 ^a
Ulangan 3	10 ^b	10 ^b	11 ^a

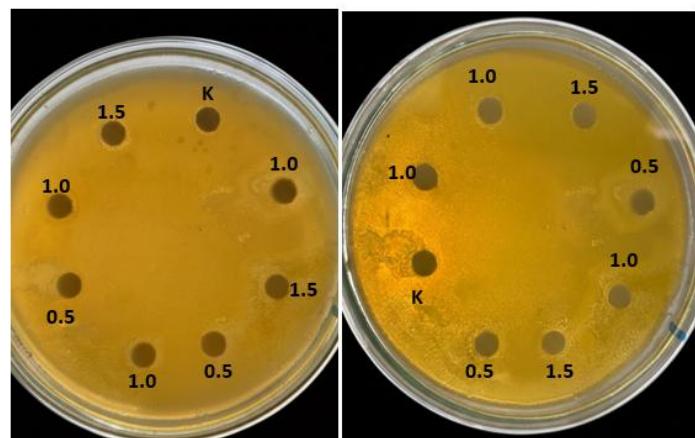


Figure 5. Appearance of the Blocking Zone on Disc Paper
Gambar 5. Penampakan Zona Hambat pada Kertas Cakram

Logam berat seperti timbal (Pb) dikenal memiliki sifat toksik terhadap mikroorganisme karena kemampuannya berikatan dengan gugus sulfhidril (-SH), karboksil (COOH), dan fosfat (PO₄³⁻) pada protein, enzim, serta asam nukleat.

Interaksi ini dapat menghambat aktivitas enzim, merusak membran sel, dan mengganggu proses metabolisme. Namun, mikroorganisme laut seperti *Marinobacter* sp. diketahui memiliki adaptasi fisiologis untuk bertahan terhadap paparan logam berat. Bakteri tersebut menunjukkan berbagai kemampuan metabolisme: anggota genus telah terbukti mengonsumsi berbagai hidrokarbon dan pewarna, menjadikannya kandidat yang baik untuk proyek bioremediasi. Beberapa bahkan dilaporkan mampu memfiksasi nitrogen, selain itu Genus ini mampu bertahan hidup dan bahkan tumbuh dalam kondisi karbon/energi yang sangat rendah (Bird *et al.*, 2023).

Peningkatan konsentrasi logam berat umumnya berbanding lurus dengan peningkatan zona hambat pada uji difusi agar. Hal ini terjadi karena gradien konsentrasi ion logam yang lebih tinggi menyebabkan perluasan daerah toksik di sekitar sumber logam, sehingga menghambat pertumbuhan mikroba dalam area yang lebih luas. Pada metode uji difusi agar, zona hambat adalah daerah bening di sekitar disk atau sumber logam yang menunjukkan tidak adanya pertumbuhan mikroba akibat efek toksik logam. Semakin tinggi konsentrasi logam berat, semakin besar zona hambat yang terbentuk, mencerminkan peningkatan toksitas dan efek penghambatan terhadap mikroba. Studi pembanding dengan inkonsistensi serupa pada pengukuran diameter zona hambat menggunakan teknik difusi cakram tidak tersedia.

Marinobacter sp. menunjukkan resistensi terhadap logam berat timbal (Pb) terutama melalui mekanisme yang melibatkan biosorpsi dan sekuestrasi intraseluler. Permukaan sel bakteri mengandung gugus kimia bermuatan negatif seperti gugus karboksil dan hidroksil yang mengikat ion Pb (II), sehingga memfasilitasi biosorpsi permukaan. Selain itu, zat polimer ekstraseluler (EPS) dapat menyekuestrasi timbal, dan secara intraseluler, timbal dapat diikat oleh protein seperti metalotionein atau diendapkan melalui aksi enzimatik (misalnya, aktivitas fosfatase) menjadi bentuk yang kurang toksik seperti timbal fosfat. Mekanisme ini memungkinkan *Marinobacter* sp. untuk menghambat toksitas timbal dengan melumpuhkan atau mendetoksifikasi ion timbal, sehingga mengurangi bioavailabilitas dan kerusakan seluler. Resistensi ini melibatkan strategi ekstraseluler dan intraseluler, termasuk sistem efluks yang mengangkat timbal keluar dari sel, yang dikodekan oleh gen resistensi timbal spesifik. Kemampuan tersebut memungkinkan *Marinobacter* sp. untuk bertahan hidup dan berpotensi mengurangi kontaminasi timbal di lingkungan yang terdapat timbal (George *et al.*, 2021).

KESIMPULAN

Isolat bakteri indigenous yang berhasil diidentifikasi memiliki ciri gram negatif berbentuk batang (basil) dan menunjukkan kemampuan mereduksi timbal (Pb) berdasarkan uji biokimia dan zona hambat pada media yang mengandung logam berat. Hasil uji resistensi menunjukkan bahwa *Marinobacter* sp memiliki daya tahan kuat terhadap logam berat Pb pada dosis 0,5 hingga 1,5 ppm, menandakan potensinya sebagai agen bioremediasi alami pada air asin yang tercemar. Kajian interaksi antara mikroorganisme dan parameter lingkungan (pH, salinitas, DO, suhu) serta simbiosis dengan bakteri lain penting dilakukan agar aplikasi

bioremediasi dapat dioptimalkan untuk pemanfaatan pada budidaya air payau.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo atas dukungan pendanaan melalui dana Penelitian Badan Layanan Umum (BLU) Tahun Anggaran 2025 Nomor. 63/KEP.PKPS/2025, yang telah memungkinkan terlaksananya penelitian ini.

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), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03793-5>
- Anwar, C., Wonggo, Djuhria, & Mongi, E. (2022). Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada Beberapa Jenis Ikan Demersal di Perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara. *Media Teknologi Hasil Perikanan*, 10(3), 198–202. <https://doi.org/10.35800/mthp.10.3.2022.43909>.
- Beiras, R. (2018). Nonpersistent Inorganic Pollution. *Marine Pollution*, 31–39. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813736-9.00003-9>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Helijon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Chakraborty, J., & Das, S. (2014). Characterization and cadmium-resistant gene expression of biofilm-forming marine bacterium *Pseudomonas aeruginosa* JP-11. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(24), 14188–14201. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3308-7>
- Cheng, L., Zhu, P., Ke, H., Hou, S., Luo, Q., & Lu, X. (2025). Metabolic versatility of *Marinobacter* and its biotechnological potential. *Biotechnology Advances*, 83, 108650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108650>
- Department of Health and Aged Care - Australian Government. (2024). *Environmental fate and effects of zinc ions*. April.
- Elawati, N. E., Lestari, C. R., & Resputri, F. (2024). Eksplorasi dan Implementasi Mikroba Indigenous Asal Limbah Batubara Sebagai agen Bioakumulator Terhadap Logam Berat Cd dan Pb. *Bioeduscience*, 8(1), 1–7. <https://doi.org/10.22236/jbes/12709>
- Fadl, M. G., Rezk, M., Amin, M. M., & Kamel, Z. M. (2017). Uranium Removal from Wastewater Using Immobilized Multiple Heavy-Metal and Antibiotic Resistance *E. coli* Isolated from Aborshid Egypt. *Advances in Recycling & Waste Management*, 02(03). <https://doi.org/10.4172/2475-7675.1000145>
- Harahap, A. (2022). Analysis of Heavy Metals in Water and Sediment in Singkep Island Coastal Waters. *International Journal of Science and Environment (IJSE)*, 2(3), 67–73.

- https://doi.org/10.51601/ijse.v2i3.49
- Misra, V., Pandey, S. D., Viswanathan, P. N., & Pandey, J. (2019). *Environmental pollution and its impact on human health*. Environmental Toxicology Review, 38(2), 95–108. https://doi.org/10.1002/etc.1234
- Musa, H., Kasim, F. H., Gunny, A. A. N., Gopinath, S. C. B., Chinni, S. V., & Ahmad, M. A. (2019). Whole genome sequence of moderate halophilic marine bacterium Marinobacter litoralis SW-45: Abundance of non-coding RNAs. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 1288–1298. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.003
- Musallamah, Aunurohim, N. A. (2022). Pengaruh Paparan Timbal (Pb) Terhadap Perubahan Histopatologis Hepatopankreas Udang Galah (*Macrobrachium rosenbergii De Mann*). *Jurnal analisis kesehatan klinikal sains*, 10(82), 97–102.
- Ouyang, X., Li, Q., & Du, K. (2020). How does environmental regulation promote technological innovations in the industrial sector? Evidence from Chinese provincial panel data. *Energy Policy*, 139, 111310. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111310>
- Pambudiono, A., Suarsini, E., & Amin, M. (2018). The Potential of Indigenous Bacteria for Removing Cadmium from Industrial Wastewater in Lawang, East Java. *Journal of Tropical Life Science*, 8(1), 62–67. https://doi.org/10.11594/jtls.08.01.11
- Pratiwi, D. Y. (2020). Dampak Pencemaran Logam Berat (Timbal, Tembaga, Merkuri, Kadmium, Krom) terhadap Organisme Perairan dan Kesehatan Manusia. *Akuatik*, 1(1), 59–65. <https://doi.org/10.24198/akuatik.v1i1.28135>
- Prayogo, Rahardja, B. S., Asshanti, A. N., Dewi, N. N., & Santanumurti, M. B. (2018). Exploration of indigenous bacteria in an intensive aquaculture system of African catfish (*Clarias sp.*) in Banyuwangi, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 137(1).
- https://doi.org/10.1088/1755-1315/137/1/012085
- Prayogr, G., Utomo, B. A., & Effendi, H. (2022). Heavy Metals Contamination Level and Water Quality Parameter Conditions in Jatiluhur Reservoir, West Java, Indonesia. *Biotropia*, 29(1), 12–22. https://doi.org/10.11598/btb.2022.29.1.1443
- Qiao, H. T., Qiao, Y. S., Luo, X. H., Zhao, B. W., & Cai, Q. Y. (2021). Qualitative and quantitative adsorption mechanisms of zinc ions from aqueous solutions onto dead carp derived biochar. *RSC Advances*, 11(60), 38273–38282. https://doi.org/10.1039/d1ra05636k
- Richter, M. F., Drown, B. S., Riley, A. P., Garcia, A., Shirai, T., Svec, R. L., & Hergenrother, P. J. (2017). Predictive compound accumulation rules yield a broad-spectrum antibiotic. *Nature*, 545(7654), 299–304. https://doi.org/10.1038/nature22308
- Shah, S. M., Khan, S., Bibi, N., Rehman, B., Ali, R., Shireen, F., Yilmaz, S., Ali, Q., Ullah, A., & Ali, D. (2025). Indigenous bacteria as potential agents for trace metal remediation in industrial wastewater. *Scientific Reports*, 15(1), 1–22. https://doi.org/10.1038/s41598-025-97711-y
- Singh, S., & Hiranmai, R. Y. (2021). Monitoring and molecular characterization of bacterial species in heavy metals contaminated roadside soil of selected region along NH 8A, Gujarat. *Heliyon*, 7(11), e08284. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08284
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In A. Luch (Ed.), *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* (pp. 133–164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Wijayanti, T. (2017). Bioremediasi Limbah Tercemar Kadmium (Cd) Pada Perairan Di Kabupaten Pasuruan Menggunakan Bakteri Indigen Secara Ex-Situ. 4(2).
- Zakiyah, U. (2024). Heavy Metal Zinc (Zn) in Sediments and Roots of Mangrove Sonneratia Alba and Avicennia Marina