

Isolasi, Karakterisasi, dan Evaluasi Potensi Bioremediasi Bakteri Toleran Timbal (Pb) dari Perairan Batam

Raisa Faiza Shahira, Delita Zul*

Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Riau, Indonesia

*Corresponding author: delita.zul@lecturer.unri.ac.id



©2026. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Info Artikel: Diterima 7 Juni 2026 ; Direvisi 9 Oktober 2026 ; Disetujui 15 Oktober 2026

Tersedia online : 26 Oktober 2026 ; Diterbitkan secara teratur : Oktober 2026



Cara sitasi: Zul D, Shahira RF. Isolasi, Karakterisasi, dan Evaluasi Potensi Bioremediasi Bakteri Toleran Timbal (Pb) dari Perairan Batam. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2026 Okt;25(3):374-386. <https://doi.org/10.14710/jkli.85310>.

ABSTRAK

Latar belakang: Pencemaran logam berat timbal (Pb) di perairan pesisir menjadi perhatian serius karena bersifat persisten, terakumulasi dalam rantai makanan, dan berisiko menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia. Kota Batam sebagai kawasan industri pesisir diketahui telah terkontaminasi Pb melebihi ambang baku pada berbagai komponen lingkungan, termasuk air, sedimen, dan biota perairan. Penggunaan bakteri toleran logam berat dapat menjadi alternatif bioremediasi yang murah dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi bakteri toleran Pb dari perairan Batam dan mengevaluasi kemampuannya dalam menurunkan konsentrasi Pb.

Metode: Sampel air dan sedimen diambil dari Tanjung Uncang, Pelabuhan Sekupang, dan Pulau Sarang. Isolasi dilakukan menggunakan medium *Marine Agar* diperkaya Pb 10 ppm, dilanjutkan dengan uji toleransi pada konsentrasi Pb 50–1000 ppm menggunakan metode turbidimetri (OD600). Lima isolat terbaik dikarakterisasi secara morfologi dan biokimia, serta diuji kemampuannya dalam penyisihan (*removal*) Pb yang diukur menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Seluruh pengujian dilakukan dalam tiga ulangan independen. Data penyisihan Pb dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) satu arah yang dilanjutkan dengan uji Tukey HSD pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

Hasil: Kondisi fisika-kimia perairan pada seluruh lokasi penelitian menunjukkan kisaran suhu 28–29°C, pH 7,5–7,9, salinitas 29–30‰, dan DO 7,8–8,2 mg/L. Sebanyak 32 isolat bakteri toleran Pb berhasil diisolasi, dengan jumlah isolat dari sedimen lebih tinggi dibandingkan isolat dari air. Enam isolat mampu bertahan hingga konsentrasi Pb 800 ppm, sedangkan tidak ada isolat yang tumbuh pada konsentrasi 1000 ppm. Isolat TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3 menunjukkan kemampuan penyisihan Pb tertinggi dengan efisiensi masing-masing sebesar 86,85% dan 84,56%. Karakterisasi menunjukkan dominasi bakteri Gram negatif berbentuk basil dan coccobacillus, serta satu isolat Gram positif berbentuk kokus.

Simpulan: Isolat TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3 menunjukkan potensi tertinggi sebagai agen bioremediasi Pb karena mampu bertahan hingga konsentrasi Pb 800 ppm dengan efisiensi penyisihan masing-masing sebesar 86,85% dan 84,56%. Temuan ini menunjukkan bahwa sedimen perairan Batam merupakan sumber potensial bakteri indigenus untuk pengembangan teknologi bioremediasi logam berat di lingkungan pesisir. Kedua isolat tersebut direkomendasikan untuk penelitian lanjutan melalui identifikasi molekuler, optimasi kondisi bioremediasi, dan pengujian pada skala lapangan.

Kata kunci: Bioremediasi; Bakteri laut; Logam berat; Penyisihan Pb; Resistensi Pb

ABSTRACT

Title: Isolation, Characterization, and Assessment of the Bioremediation Potential of Lead (Pb)-Tolerant Bacteria from Batam Coastal Waters

Background: Lead (Pb) contamination in coastal waters is persistent and accumulative in the food chain, posing serious health hazards (neurological, renal, hematological effects, cancer). Batam City, an industrial coastal area, has reported Pb levels exceeding quality standards in water, sediment, and biota. Heavy-metal-degrading bacteria offer a cost-effective bioremediation approach. This study aimed to isolate Pb-tolerant bacteria from the coastal waters of Batam and evaluate their Pb-removal capability.

Method: Water and sediment samples were collected from Tanjung Uncang, Sekupang Port, and Pulau Sarang. Isolation was conducted using Marine Agar supplemented with 10 ppm Pb, followed by tolerance testing at Pb concentrations ranging from 50–1000 ppm using the turbidimetric method (OD600). The five best isolates were further evaluated for their Pb-removal ability using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) and characterized for morphological and biochemical properties. All experiments were conducted in triplicate. Pb removal data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test at a 95% confidence level ($\alpha = 0.05$).

Result: The physicochemical characteristics of the sampling sites showed temperatures of 28–29°C, pH 7.5–7.9, salinity 29–30‰, and dissolved oxygen 7.8–8.2 mg/L. A total of 32 Pb-tolerant bacterial isolates were successfully obtained, with sediment samples yielding more isolates than water samples. Six isolates survived at Pb concentrations up to 800 ppm, whereas none exhibited growth at 1000 ppm. Isolates TJS 3.6.2 and TJS 2.6.3 demonstrated the highest Pb reduction efficiencies, reaching 86.85% and 84.56%, respectively. Characterization results revealed the predominance of Gram-negative bacilli and coccobacilli, along with one Gram-positive coccus isolate.

Conclusion: Isolates TJS 3.6.2 and TJS 2.6.3 exhibited the highest potential as Pb bioremediation agents, as they tolerated Pb concentrations of up to 800 ppm and achieved Pb removal efficiencies of 86.85% and 84.56%, respectively. These findings indicate that sediments from the coastal waters of Batam are a promising source of indigenous bacteria for the development of heavy metal bioremediation technologies in coastal environments. These isolates are recommended for further studies involving molecular identification, optimization of bioremediation conditions, and field-scale applications.

Keywords: Bioremediation; Lead resistance; Marine bacteria; Pb reduction; Heavy metals

PENDAHULUAN

Timbal (Pb) merupakan salah satu logam berat beracun yang menjadi perhatian utama dalam pencemaran lingkungan perairan karena bersifat persisten, sulit terdegradasi, serta dapat mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi melalui rantai makanan. Keberadaan Pb di lingkungan perairan berpotensi sebagai penyebab gangguan pada ekosistem dan kesehatan manusia.¹ Paparan Pb kronis telah dikaitkan dengan berbagai masalah kesehatan serius, termasuk gangguan perkembangan otak pada anak, efek neurotoksik, kerusakan ginjal, gangguan hematologi, serta peningkatan risiko kanker.^{2,3} Dengan sifat toksisitas dan persistensinya tersebut, pencemaran Pb di lingkungan khususnya di perairan menjadi permasalahan lingkungan yang membutuhkan strategi pengelolaan yang efektif dan berkelanjutan. Secara global, pencemaran Pb di ekosistem perairan telah menjadi ancaman lingkungan yang besar. Masukan Pb ke lingkungan perairan melalui limbah industri, aktivitas pelayaran, erosi sedimen, dan deposisi atmosfer⁴, kemudian terakumulasi dalam jaringan biota laut dan terdistribusi melalui rantai makanan. Keberadaan Pb, bahkan pada konsentrasi rendah, dapat menghambat pertumbuhan plankton, mengganggu pertumbuhan dan reproduksi tumbuhan maupun hewan, menurunkan keberhasilan reproduksi ikan, serta menyebabkan kematian organisme akuatik.^{5,6} Selain itu, kandungan Pb yang tinggi dapat memicu perubahan struktur komunitas ekosistem, meningkatkan risiko eutrofikasi, dan menurunkan kualitas habitat perairan.⁴

Di Indonesia, pencemaran Pb di wilayah pesisir juga semakin mengkhawatirkan. Penelitian di perairan Semarang menunjukkan konsentrasi Pb pada air laut sebesar 0,059–0,067 mg/L, yang melebihi baku mutu air laut sebesar 0,008 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021.⁷ Kota Batam merupakan salah satu kawasan pesisir strategis di Indonesia yang memiliki aktivitas industri, pelabuhan internasional, transportasi laut, serta galangan kapal yang berkembang pesat. Kondisi ini menjadikan Batam sebagai wilayah dengan tekanan antropogenik tinggi yang berpotensi meningkatkan akumulasi logam berat di lingkungan perairan. Sejumlah penelitian sebelumnya di Batam telah mengkaji keberadaan Pb di berbagai lingkungan akuatik, seperti air laut, sedimen, lamun, rumput laut, serta organisme perairan.^{8–11} Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi Pb di beberapa lokasi telah melampaui baku mutu lingkungan, misalnya pada perairan Pantai Nongsa yang mencapai 2,76 mg/L, serta adanya akumulasi logam berat lain, seperti Cu dan Cd, di kawasan pesisir.^{9,11} Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih berfokus pada aspek pemantauan dan distribusi logam berat, tanpa mengkaji mekanisme alami yang berpotensi digunakan untuk memitigasi pencemaran.

Berbagai metode konvensional telah dikembangkan untuk menurunkan konsentrasi Pb di perairan, seperti filtrasi, osmosis balik, pengendapan kimia, dan pertukaran ion.^{12,13} Meskipun metode tersebut efektif dalam mengurangi konsentrasi logam berat, pendekatan ini memiliki sejumlah kelemahan. Di antaranya yaitu biaya operasional yang tinggi, penggunaan bahan kimia berbahaya, kurang selektif terhadap jenis logam tertentu, serta menghasilkan limbah sekunder yang juga berpotensi mencemari lingkungan.¹⁴ Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan alternatif yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah bioremediasi menggunakan bakteri toleran logam berat, yang bekerja dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme dalam mendetoksifikasi atau mengikat logam berbahaya.

Bakteri toleran Pb diketahui memiliki kemampuan adaptasi terhadap lingkungan tercemar melalui berbagai mekanisme, seperti biosorpsi pada permukaan sel, produksi *extracellular polymeric substances* (EPS), bioakumulasi, biopresipitasi, serta sistem efluks ion logam.¹⁵ Mekanisme ini memungkinkan bakteri bertahan di lingkungan ekstrem sekaligus menurunkan konsentrasi Pb di perairan. Berbagai penelitian telah menemukan sejumlah isolat bakteri indigenus yang memiliki kemampuan tinggi dalam mentoleransi Pb serta menunjukkan potensi besar sebagai agen bioremediasi. Penelitian terhadap isolat *Bacillus* dari tanah tercemar di Malang menunjukkan bahwa bakteri tersebut mampu menurunkan konsentrasi Pb hingga 69,1%.¹⁶ Hasil serupa juga ditemukan pada isolat bakteri Gram positif dan Gram negatif asal perairan Teluk Lamong, Surabaya yang menunjukkan toleransi tinggi terhadap Pb dan kemampuan penyisihan yang signifikan.¹⁷ Hasil serupa juga ditunjukkan oleh isolat bakteri asal perairan laut Dumai yang mampu menurunkan konsentrasi Pb hingga 77,21%.¹⁸ Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa eksplorasi bakteri lokal dari lingkungan yang tercemar merupakan pendekatan yang efektif untuk memperoleh kandidat agen bioremediasi yang adaptif.

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan adanya pencemaran logam berat di perairan Batam. Kandungan Pb pada rumput laut, alga, dan mangrove di kawasan pesisir Batam dilaporkan telah melampaui baku mutu nasional.⁸ Selain itu, penelitian di pesisir barat Pulau Batam juga menunjukkan bahwa konsentrasi Cu, Cd, dan Pb pada air laut melebihi baku mutu lingkungan yang ditetapkan.¹¹ Meskipun demikian, hingga saat ini belum banyak penelitian yang secara spesifik mengkaji potensi bakteri indigenus toleran Pb dari perairan Batam yang mencakup isolasi, karakterisasi, serta evaluasi kemampuan toleransi dan penyisihan Pb. Padahal, kondisi lingkungan Batam yang telah terpapar logam berat dalam jangka waktu lama berpotensi menghasilkan komunitas bakteri yang telah beradaptasi secara alami dan memiliki efisiensi tinggi dalam menghadapi tekanan logam berat. Ketiadaan informasi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang signifikan, yaitu belum terintegrasinya data pencemaran logam berat dengan potensi pemanfaatan kekayaan bakteri lokal sebagai solusi bioremediasi di wilayah Batam. Penelitian ini didasarkan pada hipotesis bahwa perairan Batam, terutama habitat yang mengalami tekanan logam berat, memiliki bakteri indigenus yang mampu beradaptasi terhadap Pb dan memiliki kemampuan untuk menurunkan konsentrasi Pb melalui mekanisme interaksi mikroba-logam. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi dan mengkarakterisasi bakteri toleran Pb dari perairan Batam, mengevaluasi tingkat toleransi terhadap berbagai konsentrasi Pb, serta menentukan kemampuan penyisihan Pb sebagai dasar seleksi kandidat bakteri potensial untuk pengembangan strategi bioremediasi logam berat berbasis mikroorganisme lokal.

MATERI DAN METODE

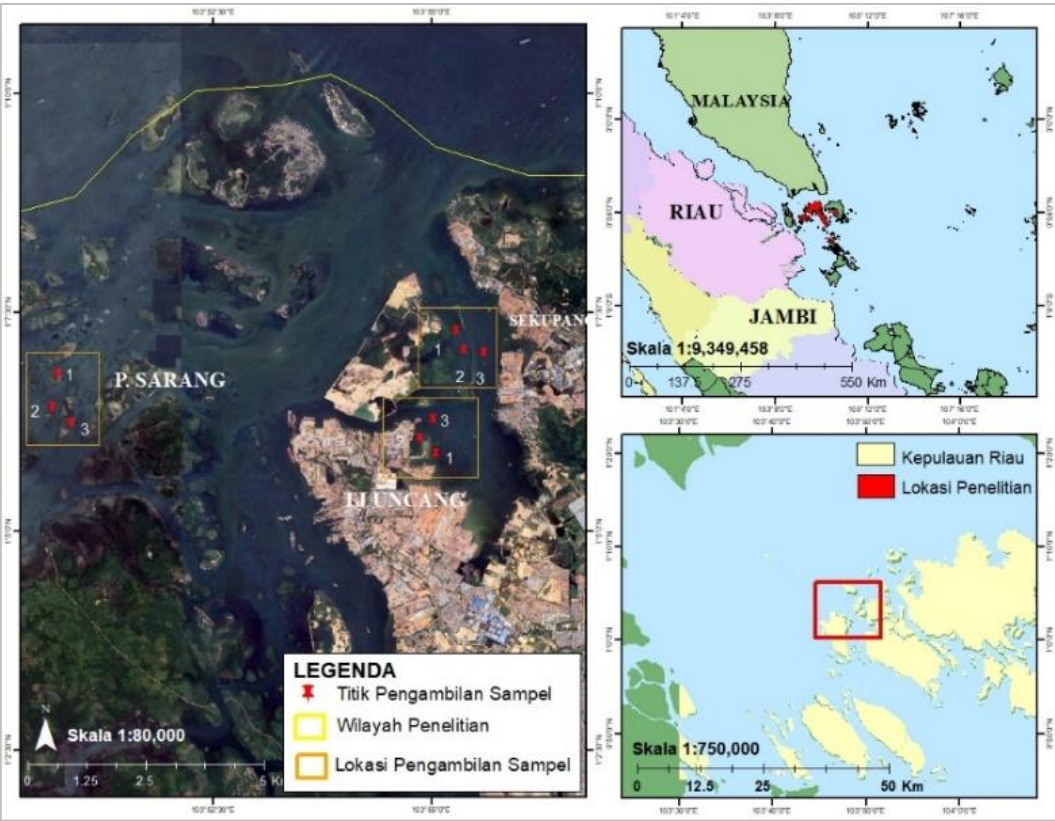
Jenis Penelitian dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan deskriptif-komparatif. Tahap eksplorasi bakteri dilakukan secara deskriptif melalui isolasi dan karakterisasi bakteri toleran Pb dari sampel lingkungan perairan, sedangkan pengujian kemampuan toleransi dan penyisihan Pb dilakukan secara eksperimental menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL). Uji toleransi Pb dilakukan dengan perlakuan variasi konsentrasi Pb, sedangkan uji penyisihan Pb dilakukan pada isolat terseleksi berdasarkan kemampuan toleransi tertinggi. Setiap perlakuan dilakukan sebanyak tiga kali ulangan untuk memperoleh data yang representatif. Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yaitu pengambilan sampel air laut dan sedimen, isolasi bakteri toleran Pb, pengujian toleransi terhadap berbagai konsentrasi Pb, seleksi isolat potensial, evaluasi kemampuan penyisihan Pb, serta karakterisasi morfologi dan biokimia isolate yang terseleksi. Seluruh analisis mikrobiologi dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi FMIPA Universitas Riau, sedangkan pengujian kemampuan penyisihan Pb dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Riau.

Deskripsi Lokasi dan Metode Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling* di tiga lokasi perairan Kota Batam, yaitu Tanjung Uncang, Pelabuhan Sekupang, dan Pulau Sarang. Pemilihan lokasi didasarkan pada perbedaan aktivitas antropogenik yang berpotensi menjadi sumber masukan logam berat, seperti aktivitas industri, pelabuhan, galangan kapal, dan aktivitas pesisir lainnya. Pada setiap lokasi ditetapkan tiga titik pengambilan sampel sebagai ulangan, sehingga diperoleh sembilan titik sampling secara keseluruhan. Koordinat dan deskripsi masing-masing titik pengambilan sampel disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 1. Sampel air laut dan sedimen diambil dari zona intertidal pada sore hari antara pukul 16.00–18.00 WIB. Waktu tersebut dipilih karena kondisi laut saat surut, suhu perairan relatif stabil, arus cenderung tenang, dan aktivitas perairan menurun, sehingga kondisi lingkungan lebih

konstan. Tiga titik sampling untuk setiap lokasi ditentukan secara acak terbatas (*random within site*) dengan jarak antar titik ± 200 m. Sampel air diambil secara aseptik ke dalam botol polipropilen steril berkapasitas 250 mL saat gelombang ombak mendekat ke arah pantai. Sampel sedimen diambil dari lapisan atas dasar perairan dengan menyelam pada perairan dalam, serta spatula steril pada perairan dangkal sebanyak ± 50 g, lalu dimasukkan ke dalam *conical tube* steril. Seluruh sampel dimasukkan ke dalam cool box bersuhu $\pm 4^{\circ}\text{C}$ selama transportasi menuju laboratorium.¹⁹ Selain itu, parameter lingkungan meliputi suhu, pH, salinitas, dan *dissolved oxygen* (DO) diukur secara *in situ* menggunakan alat multiparameter.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel

Tabel 1. Titik koordinat dan deskripsi lokasi pengambilan sampel

Lokasi Pengambilan Sampel	Deskripsi Lokasi	Titik	Latitude (Lintang)	Longitude (Bujur)
Tanjung Uncang	Kawasan pesisir dengan aktivitas galangan kapal dan industri maritim yang intensif	1	1°05'55" N	103°55'00" E
		2	1°06'03" N	103°54'52" E
		3	1°05'60" N	103°54'34" E
Pelabuhan Sekupang	Kawasan pelabuhan utama dengan aktivitas transportasi laut dan kapal yang tinggi	1	1°07'17" N	103°55'17" E
		2	1°07'04" N	103°55'22" E
		3	1°07'02" N	103°55'36" E
Pulau Sarang	Kawasan pesisir pemukiman masyarakat dengan aktivitas domestik di sepanjang pantai	1	1°06'47" N	103°50'44" E
		2	1°06'36" N	103°50'42" E
		3	1°06'06" N	103°50'51" E

Isolasi dan Purifikasi Bakteri

Sampel air laut dan sedimen diencerkan secara seri menggunakan larutan NaCl fisiologis 0,9% hingga masing-masing mencapai pengenceran 10^{-4} dan 10^{-6} . Sebanyak 0,1 mL hasil pengenceran diinokulasikan pada medium *Zobell Marine Agar* (55,25 g/L) yang diperkaya dengan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 10 ppm menggunakan metode *spread plate*, kemudian diinkubasi pada suhu ruang ($28\text{--}30^{\circ}\text{C}$) selama 72 jam. Koloni yang tumbuh dan menunjukkan perbedaan morfologi dipilih, kemudian dipurifikasi pada medium *Nutrient Agar* (NA; Himedia M001, 28 g/L) menggunakan metode *streak plate* dan diinkubasi kembali pada suhu ruang selama 24–48 jam hingga diperoleh isolat murni¹⁸.

Uji Toleransi Pb

Isolat murni disuspensikan dalam larutan NaCl fisiologis 0,9% dan kekeruhannya disesuaikan dengan standar McFarland 0,5. Sebanyak 1 mL suspensi diinokulasikan ke dalam medium *Nutrient Broth* (NB; Himedia M002, 13 g/L) yang diperkaya dengan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ pada konsentrasi 50, 100, 200, 400, 600, 800, dan 1000 ppm. Kultur diinkubasi selama 24 jam pada suhu ruang (28–30°C) menggunakan *incubator shaker* pada kecepatan 120 rpm. Tingkat toleransi bakteri ditentukan berdasarkan nilai densitas optik (OD) pada panjang gelombang 600 nm menggunakan spektrofotometer. Isolat yang menunjukkan pertumbuhan terbaik pada konsentrasi Pb tertinggi dipilih untuk tahap uji penyisihan.

Uji Penyisihan Pb

Uji penyisihan dilakukan terhadap lima isolat terpilih yang menunjukkan toleransi tertinggi terhadap Pb. Isolat diremajakan pada medium NA, kemudian dibuat suspensi setara McFarland 0,5 dan ditumbuhkan pada medium NB sebagai kultur starter selama 24 jam. Uji penyisihan dilakukan menggunakan 50 mL medium NB yang telah ditambahkan 5 mL inokulum bakteri dan 20 mL larutan stok $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 1000 ppm, sehingga diperoleh konsentrasi awal Pb sebesar 400 ppm. Kultur kemudian diinkubasi menggunakan *incubator shaker* pada suhu ruang selama 24 jam dengan kecepatan 120 rpm. Sebagai pembandingan, disiapkan kontrol berupa medium NB yang mengandung Pb dengan konsentrasi yang sama tanpa penambahan inokulum bakteri. Setelah inkubasi, kultur perlakuan dan kontrol disentrifugasi pada kecepatan 10.000 rpm selama 5 menit dan supernatan dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi Pb akhir. Jumlah Pb yang terserap atau terimobilisasi oleh bakteri dihitung menggunakan metode yang dimodifikasi¹⁸ dengan persamaan:

$$C_s = C_a - C_b$$

Efisiensi penyisihan Pb dihitung berdasarkan perbedaan konsentrasi Pb antara kontrol dan perlakuan setelah inkubasi untuk mengoreksi penurunan Pb yang terjadi secara nonbiologis, sehingga nilai yang diperoleh lebih merepresentasikan kontribusi bakteri dalam menurunkan konsentrasi Pb.

$$D = \frac{C(a) - C(b)}{C(a)} \times 100\%$$

Keterangan:

D = efisiensi penyisihan Pb (%)

C_s = jumlah Pb yang terserap (ppm)

$C(a)$ = konsentrasi Pb pada kontrol setelah inkubasi (ppm)

$C(b)$ = konsentrasi Pb pada perlakuan setelah inkubasi (ppm)

Karakterisasi Parsial Isolat Terseleksi

Karakterisasi isolat dilakukan melalui pengamatan morfologi koloni pada medium *Nutrient Agar* (NA) setelah inkubasi 24 jam, meliputi bentuk, warna, tepian, dan elevasi koloni. Karakterisasi mikroskopis dilakukan dengan pewarnaan Gram untuk menentukan bentuk sel dan tipe dinding sel bakteri. Selanjutnya, karakterisasi biokimia meliputi uji *Triple Sugar Iron Agar* (TSIA), katalase, *Methyl Red* (MR), *Voges-Proskauer* (VP), indol, sitrat, H_2S , dan motilitas menggunakan media dan reagen yang sesuai. Seluruh pengujian diinkubasi pada suhu ruang selama 24–48 jam, kemudian hasil diamati berdasarkan perubahan warna media, pembentukan gelembung gas, endapan, maupun pola pertumbuhan yang muncul pada masing-masing uji.

Analisis Data

Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif, baik kuantitatif maupun kualitatif, kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan gambar untuk menggambarkan kemampuan toleransi, penyisihan Pb, serta karakteristik isolat bakteri. Perbedaan kemampuan penyisihan Pb antar isolat dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) satu arah, kemudian dilanjutkan dengan uji Tukey HSD pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS *Statistics* versi 25.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakter Fisikokimia Lokasi Sampling

Hasil pengukuran parameter fisikokimia pada ketiga lokasi penelitian menunjukkan kondisi perairan yang relatif seragam dan masih mencerminkan karakteristik perairan laut tropis (Tabel 2). Parameter fisikokimia perairan berperan penting dalam memengaruhi distribusi, aktivitas, dan adaptasi bakteri toleran logam berat serta menentukan spesiasi dan bioavailabilitas Pb di lingkungan.

Tabel 2. Karakteristik fisika-kimia perairan Kota Batam

Parameter	Lokasi		
	Tanjung Uncang	Pelabuhan Sekupang	Pulau Sarang
Suhu (°C)	29	29	28
pH	7,9	7,5	7,8
Salinitas (‰)	29	30	30
DO (mg/L)	7,9	8,2	7,8

Kondisi fisikokimia yang diperoleh pada penelitian ini relatif serupa dengan karakteristik perairan pesisir Batam yang dilaporkan Ramses (2023), yang menunjukkan kisaran suhu, salinitas, dan oksigen terlarut yang tidak jauh berbeda.²⁰ Kesamaan tersebut mengindikasikan bahwa faktor fisikokimia perairan pada lokasi penelitian tidak mengalami penyimpangan yang mencolok dibandingkan dengan perairan pesisir Batam lainnya. Berdasarkan PP Nomor 22 Tahun 2021 dan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang baku mutu air laut, kisaran suhu, pH, salinitas, dan oksigen terlarut pada seluruh lokasi penelitian masih berada dalam rentang yang mendukung kehidupan biota laut. Dengan demikian, parameter fisikokimia tersebut diperkirakan bukan merupakan faktor pembatas utama terhadap keberadaan bakteri toleran Pb di lokasi penelitian.

Kondisi fisikokimia yang relatif stabil tersebut mendukung aktivitas metabolisme bakteri serta berbagai mekanisme toleransi terhadap logam berat. Suhu yang sesuai mendukung aktivitas enzim yang berperan dalam proses detoksifikasi logam, sedangkan pH netral hingga sedikit basa memengaruhi kelarutan dan bioavailabilitas Pb di lingkungan perairan.²¹ Salinitas khas perairan laut turut berperan dalam proses osmoregulasi bakteri dan dapat memengaruhi bentuk kimia Pb melalui pembentukan kompleks klorida, sehingga memengaruhi respons mikroorganisme terhadap logam berat.^{22,23} Selain itu, ketersediaan oksigen yang memadai mendukung pertumbuhan bakteri aerob dan aktivitas metabolik yang diperlukan dalam mekanisme resistensi maupun bioremediasi logam berat.²⁴ Meskipun parameter fisikokimia menunjukkan kondisi yang masih memenuhi baku mutu, hal tersebut tidak secara langsung menunjukkan bahwa perairan bebas dari risiko pencemaran logam berat. Aktivitas industri, galangan kapal, pelabuhan, dan transportasi laut di wilayah Batam berpotensi menjadi sumber masukan Pb ke lingkungan perairan sehingga dapat meningkatkan tekanan selektif terhadap komunitas mikroorganisme.¹¹ Oleh karena itu, keberadaan bakteri toleran Pb pada penelitian ini diduga lebih berkaitan dengan paparan logam berat akibat aktivitas antropogenik dibandingkan dengan variasi kondisi fisikokimia perairan.

Isolat Bakteri Toleran Pb

Sebanyak 32 isolat bakteri toleran Pb berhasil diisolasi dari sampel air dan sedimen yang berasal dari tiga lokasi penelitian, yaitu Tanjung Uncang, Pelabuhan Sekupang, dan Pulau Sarang. Distribusi isolat berdasarkan lokasi dan jenis sampel disajikan pada Tabel 3, sedangkan representasi koloni tampak hasil isolasi pada medium *Marine Agar* yang diperkaya Pb 10 ppm disajikan pada Gambar 2. Secara keseluruhan, jumlah isolat yang diperoleh dari sedimen (56,25%) lebih tinggi dibandingkan air laut (43,75%). Berdasarkan lokasi, Tanjung Uncang menghasilkan jumlah isolat tertinggi, masing-masing sebanyak delapan isolat dari sampel air (TJA) dan delapan isolat dari sedimen (TJS), sehingga total mencapai 50% dari seluruh isolat yang diperoleh. Sebaliknya, jumlah isolat terendah ditemukan pada Pelabuhan Sekupang, yaitu tiga isolat dari air (SKA) dan tiga isolat dari sedimen (SKS). Tingginya jumlah isolat yang diperoleh dari sedimen menunjukkan bahwa habitat ini merupakan tempat yang lebih mendukung pertumbuhan bakteri toleran Pb dibandingkan kolom air.

Logam Pb di lingkungan perairan umumnya memiliki afinitas tinggi terhadap partikel organik dan mineral sehingga cenderung teradsorpsi dan terakumulasi pada sedimen. Akumulasi tersebut menyebabkan sedimen berfungsi sebagai reservoir logam berat.²⁵ Dalam kondisi demikian, bakteri yang memiliki mekanisme adaptasi terhadap logam berat, seperti biosorpsi, bioakumulasi, pembentukan eksopolisakarida (EPS), maupun sistem efluks logam mampu bertahan dan berkembang dibandingkan bakteri yang sensitif.^{23,26,27} Perbedaan jumlah isolat antar lokasi juga mengindikasikan adanya variasi kondisi lingkungan dan tingkat tekanan antropogenik. Tanjung Uncang yang menghasilkan jumlah isolat tertinggi merupakan kawasan yang dikenal memiliki aktivitas industri, pelabuhan, dan galangan kapal yang intensif. Aktivitas tersebut berpotensi meningkatkan masukan logam berat ke lingkungan perairan melalui limbah industri, aktivitas perkapalan, penggunaan cat anti-karat, maupun emisi dari kegiatan maritim. Paparan logam berat dalam jangka panjang dapat mendorong proses seleksi alami sehingga terbentuk komunitas bakteri yang lebih toleran terhadap Pb.²⁸ Sebaliknya, jumlah isolat yang lebih rendah di Pelabuhan Sekupang dan Pulau Sarang menunjukkan bahwa faktor lingkungan setempat, termasuk tingkat pencemaran, karakteristik sedimen, ketersediaan bahan organik, dan kondisi fisik-kimia perairan, dapat memengaruhi kelimpahan bakteri toleran logam berat.

Tabel 3. Distribusi isolat bakteri toleran Pb yang berhasil berdasarkan lokasi dan jenis sampel

Jenis Sampel	Kode Isolat	Jumlah	Persentase Isolat (%)	Total
Air	TJA	8	57,1	14
	SKA	3	21,4	
	PSA	3	21,4	
Sedimen	TJS	8	44,4	18
	SKS	3	16,7	
	PSS	7	38,9	
Total			100	32

Keterangan:

TJA : Air Tanjung Uncang

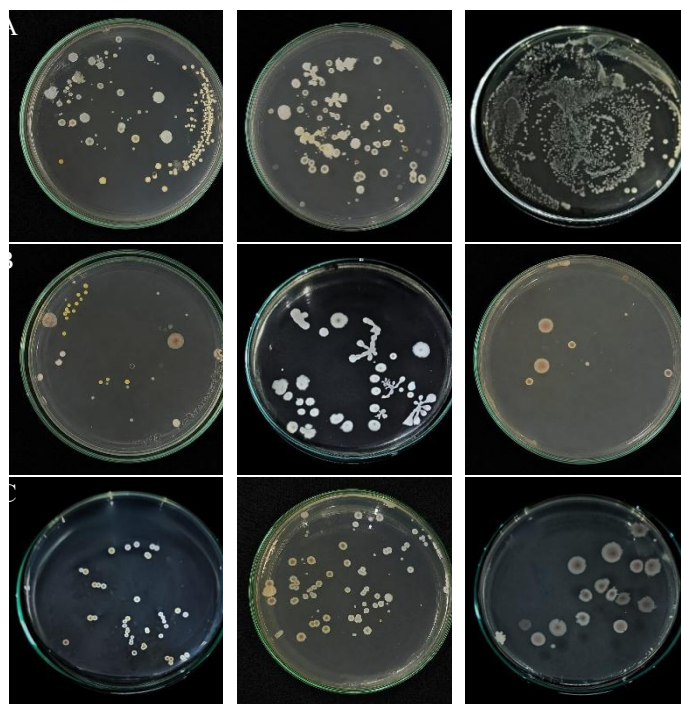
SKA : Air Sekupang

PSA : Air Pulau Sarang

TJS : Sedimen Tanjung Uncang

SKS : Sedimen Sekupang

PSS : Sedimen Pulau Sarang

Gambar 2. Penampakan koloni bakteri hasil isolasi pada media *marine agar* yang diperkaya Pb 10 ppm di berbagai lokasi: (A) Tanjung Uncang, (B) Pelabuhan Sekupang, (C) Pulau Sarang

Toleransi Isolat Terhadap Variasi Konsentrasi Pb

Kemampuan isolat bakteri untuk bertahan terhadap paparan Pb dievaluasi melalui pengukuran pertumbuhan pada medium yang mengandung Pb dengan konsentrasi 50–1000 ppm berdasarkan nilai OD600 setelah inkubasi 24 jam (Tabel 4). Secara umum, peningkatan konsentrasi Pb diikuti penurunan pertumbuhan bakteri, yang tercermin dari semakin rendahnya nilai OD600 dan berkurangnya jumlah isolat yang mampu bertahan. Pola ini menunjukkan bahwa Pb memberikan tekanan selektif yang semakin kuat seiring meningkatnya konsentrasi logam dalam medium. Pada konsentrasi 50–200 ppm, sebagian besar isolate menunjukkan pertumbuhan yang relatif baik. Namun, ketika konsentrasi Pb meningkat menjadi 400 ppm atau lebih, hanya sebagian isolat yang mampu mempertahankan pertumbuhannya. Dari total 32 isolat yang diuji, enam isolat (18,75%) masih mampu tumbuh pada konsentrasi 800 ppm, yaitu TJA 1.3.1, TJA 3.3.2, TJS 2.6.3, TJS 3.6.2, SKA 3.3.1, dan PSS 2.6.1. Sebaliknya, tidak ditemukan pertumbuhan pada konsentrasi 1000 ppm, yang menunjukkan bahwa batas toleransi seluruh isolat berada pada kisaran di atas 800 ppm tetapi tidak melebihi 1000 ppm. Di antara isolat yang diuji, TJA 1.3.1 menunjukkan pertumbuhan tertinggi pada konsentrasi rendah hingga sedang, sedangkan PSS 2.6.1 mempertahankan nilai OD600 yang relatif tinggi pada 400 ppm, mengindikasikan kapasitas adaptasi yang baik terhadap cekaman Pb.

Tingginya toleransi yang ditunjukkan oleh beberapa isolat mengindikasikan bahwa komunitas bakteri di perairan Batam telah mengalami proses adaptasi terhadap keberadaan logam berat di lingkungannya. Fenomena ini umum dijumpai pada habitat pesisir yang menerima masukan kontaminan secara terus-menerus, di mana tekanan seleksi lingkungan mendorong berkembangnya mikroorganisme dengan kemampuan resistensi yang lebih

baik. Kisaran toleransi yang diperoleh pada penelitian ini sebanding dengan laporan sebelumnya mengenai bakteri resisten Pb yang diisolasi dari sedimen mangrove Pulau Bintan dengan nilai MIC mencapai 800–900 ppm.²⁹ Hasil serupa juga telah dilaporkan pada berbagai lingkungan tercemar lainnya, menunjukkan bahwa paparan logam berat dalam jangka panjang dapat membentuk komunitas mikroba yang mampu bertahan pada konsentrasi Pb yang tinggi.^{30,31}

Penurunan pertumbuhan yang terjadi pada konsentrasi Pb yang lebih tinggi berkaitan dengan efek toksik ion Pb^{2+} terhadap berbagai proses fisiologis sel. Logam ini dapat mengganggu aktivitas enzim melalui substitusi ion logam esensial, memicu pembentukan spesies oksigen reaktif, merusak integritas membran sel, serta menghambat sintesis DNA dan protein.^{15,28,32} Akumulasi gangguan tersebut pada akhirnya menurunkan efisiensi metabolisme dan membatasi pertumbuhan bakteri. Sebaliknya, kemampuan beberapa isolat untuk tetap tumbuh hingga 800 ppm menunjukkan keberadaan mekanisme resistensi yang efektif. Pada bakteri, toleransi terhadap Pb umumnya melibatkan kombinasi berbagai strategi, termasuk pengeluaran ion logam melalui sistem *efflux*, pengikatan logam pada permukaan sel melalui gugus fungsional dinding sel, produksi EPS, pembentukan biofilm, serta proses bioakumulasi dan sekuestrasi yang mengurangi fraksi logam bebas yang bersifat toksik.^{22–24,27,32,33} Hasil uji toleransi menunjukkan bahwa isolat bakteri dari perairan Batam memiliki kapasitas adaptif yang baik terhadap cekaman Pb. Kemampuan sebagian isolat untuk bertahan pada konsentrasi hingga 800 ppm menegaskan potensinya sebagai kandidat agen bioremediasi.

Tabel 4. Pertumbuhan isolat bakteri pada berbagai konsentrasi Pb yang diukur pada OD 600 inkubasi 24 jam

Isolat	Konsentrasi Pb (ppm)						
	50	100	200	400	600	800	1000
TJA 1.3.1	1,397	1,076	0,858	0,435	0,466	0,189	-
TJA 1.3.2	0,144	0,147	-	-	-	-	-
TJA 2.3.1	0,705	0,640	0,652	0,130	-	-	-
TJA 2.3.2	0,969	0,733	0,873	0,375	0,108	-	-
TJA 2.4.1	0,256	0,225	0,349	-	-	-	-
TJA 2.4.2	0,503	0,417	0,476	0,172	-	-	-
TJA 3.3.1	0,267	0,334	0,337	-	-	-	-
TJA 3.3.2	1,044	0,822	0,778	0,537	0,334	0,110	-
TJS 1.6.1	1,004	0,960	0,942	0,388	0,248	-	-
TJS 1.6.2	0,017	0,160	0,045	-	-	-	-
TJS 1.6.3	0,437	0,359	0,545	-	-	-	-
TJS 2.6.1	0,480	0,445	0,498	-	-	-	-
TJS 2.6.2	0,860	0,944	0,966	0,218	0,222	-	-
TJS 2.6.3	1,208	1,052	1,044	0,445	0,300	0,121	-
TJS 3.6.1	0,993	0,782	0,694	0,252	-	-	-
TJS 3.6.2	0,840	0,942	0,860	0,589	0,374	0,108	-
SKA 2.3.1	0,907	0,808	0,489	0,431	0,270	-	-
SKA 2.4.1	0,359	0,209	-	-	-	-	-
SKA 3.3.1	1,116	1,114	0,933	0,358	0,232	0,102	-
SKS 1.6.1	0,779	0,732	0,652	0,352	0,283	-	-
SKS 2.6.2	0,896	0,807	0,825	0,316	0,308	-	-
SKS 3.5.1	0,345	0,311	-	-	-	-	-
PSA 1.4.1	1,028	0,924	0,800	0,340	0,184	-	-
PSA 2.4.2	1,115	0,888	0,630	0,398	0,214	-	-
PSA 2.4.3	1,040	0,988	0,976	0,400	0,274	-	-
PSS 1.5.1	0,818	0,713	0,469	0,278	-	-	-
PSS 1.6.1	1,038	1,048	1,150	0,412	0,268	-	-
PSS 1.6.2	0,904	0,880	0,742	0,362	-	-	-
PSS 1.6.3	0,736	0,753	0,799	0,188	-	-	-
PSS 2.5.1	0,727	0,514	0,443	0,200	-	-	-
PSS 2.6.1	1,032	1,210	1,151	0,789	0,338	0,124	-
PSS 3.6.1	0,734	0,785	0,789	0,386	0,161	-	-

Kemampuan Penyisihan Pb oleh Isolat Terseleksi

Berdasarkan hasil uji toleransi, lima isolat dengan kemampuan bertahan terbaik pada konsentrasi Pb tinggi, yaitu TJA 1.3.1, TJA 3.3.2, TJS 2.6.3, TJS 3.6.2, dan PSS 2.6.1, dipilih untuk dievaluasi kemampuan penyisihan Pb pada medium dengan konsentrasi awal 400 ppm (Tabel 5). Pengujian ini dilakukan untuk menilai kemampuan isolat dalam menurunkan konsentrasi Pb terlarut sebagai indikator potensi pemanfaatannya dalam proses bioremediasi logam berat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh isolat mampu menyisihkan Pb dari

medium kultur, namun dengan tingkat efisiensi yang berbeda. Analisis *One-Way* ANOVA menunjukkan bahwa jenis isolat berpengaruh nyata terhadap efisiensi penyisihan Pb ($F = 15,243$; $p < 0,001$). Selanjutnya, uji lanjut Tukey HSD mengelompokkan isolat ke dalam dua kelompok yang berbeda nyata ($p < 0,05$).

Isolat TJS 3.6.2 menunjukkan efisiensi penyisihan Pb tertinggi sebesar 86,85%, namun tidak berbeda nyata dengan isolat TJS 2.6.3 yang memiliki efisiensi penyisihan sebesar 84,56%. Sebaliknya, isolat TJA 1.3.1, PSS 2.6.1, dan TJA 3.3.2 memiliki efisiensi penyisihan yang lebih rendah, masing-masing sebesar 51,42%, 51,67%, dan 42,68%, serta tidak berbeda nyata satu sama lain. Akan tetapi, ketiga isolat tersebut berbeda nyata dibandingkan dengan isolat TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3. Perbedaan kemampuan penyisihan antar isolat menunjukkan bahwa respons bakteri terhadap cekaman logam berat tidak hanya ditentukan oleh kemampuan bertahan hidup, tetapi juga oleh kapasitas masing-masing isolat dalam berinteraksi dengan ion logam di lingkungannya.

Tabel 5. Efisiensi penyisihan Pb oleh bakteri toleran Pb pada konsentrasi awal 400 ppm inkubasi 24 jam

Isolat	Rata-Rata Konsentrasi Akhir Pb (ppm)	Efisiensi Penyisihan (%)
TJA 1.3.1	78,57 ± 13,46	51,42 ^b
TJA 3.3.2	92,70 ± 21,85	42,68 ^b
TJS 2.6.3	24,97 ± 19,32	84,56 ^a
TJS 3.6.2	21,27 ± 5,37	86,85 ^a
PSS 2.6.1	78,17 ± 8,98	51,67 ^b

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan uji Tukey HSD pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Tingkat toleransi terhadap Pb ternyata tidak selalu berbanding lurus dengan kemampuan penyisihan Pb. Isolat TJA 1.3.1, misalnya, menunjukkan pertumbuhan yang relatif tinggi pada uji toleransi, tetapi hanya mampu menyisihkan sekitar setengah dari Pb yang tersedia dalam medium. Sebaliknya, isolat TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3 menunjukkan efisiensi penyisihan yang jauh lebih tinggi, demikian juga dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Temuan ini mengindikasikan bahwa mekanisme toleransi dan mekanisme penyisihan logam kemungkinan melibatkan proses fisiologis yang berbeda. Pada beberapa bakteri, toleransi terhadap logam berat lebih banyak ditentukan oleh sistem eksklusi atau *efflux* yang berfungsi mengurangi akumulasi logam di dalam sel, sedangkan kemampuan penyisihan yang tinggi umumnya berkaitan dengan kapasitas biosorpsi, bioakumulasi, pembentukan senyawa pengikat logam, atau proses imobilisasi logam di lingkungan sekitar sel.^{15,23}

Secara biokimia, biosorpsi merupakan proses pengikatan ion logam pada permukaan sel bakteri melalui interaksi elektrostatis, pertukaran ion, dan pembentukan kompleks dengan gugus fungsional pada dinding sel.^{26,27} Proses ini dapat terjadi pada biomassa hidup maupun mati dan melibatkan presipitasi, kelasi, kompleksasi, serta interaksi ionik. Selain itu, bioakumulasi merupakan proses aktif yang memerlukan energi metabolik untuk mengangkut ion logam ke dalam sel dan mengimobilisasinya melalui pengikatan dengan protein intraseluler³⁴. Mekanisme lain adalah biopresipitasi, yaitu proses ketika bakteri menghasilkan metabolit seperti fosfat, sulfida, atau karbonat yang bereaksi dengan ion Pb^{2+} dan membentuk endapan tidak larut sehingga Pb dapat dihilangkan dari fase larutan.²⁷ Dalam proses tersebut, gugus karboksil, fosfat, dan hidroksil pada dinding sel serta EPS berperan penting sebagai situs pengikatan logam. EPS juga memperluas permukaan kontak antara sel dan ion logam sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi dan imobilisasi Pb. Selain itu, transformasi enzimatis dapat terjadi melalui reaksi redoks yang dikatalisis oleh enzim bakteri sehingga Pb^{2+} dapat direduksi menjadi bentuk yang kurang toksik atau lebih mudah diendapkan.³³

Isolat bakteri laut yang diperoleh dari perairan Dumai mampu menyisihkan Pb dengan efisiensi sekitar 77–80%.¹⁸ Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan efisiensi yang diperoleh pada kedua isolat terbaik dalam penelitian ini. Sementara itu, Sa'adah *et al.* (2025) melaporkan bahwa beberapa isolat *Bacillus* dan *Pseudomonas* dari tambak yang terkontaminasi Pb mampu menyisihkan logam tersebut hingga 87–90%³⁵. Efisiensi penyisihan yang diperoleh oleh TJS 3.6.2 (86,85%) berada pada kisaran yang hampir setara dengan hasil tersebut. Kemampuan penyisihan yang ditunjukkan oleh TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3 dapat dikategorikan sebagai sangat baik, mengingat pengujian dilakukan pada konsentrasi Pb yang relatif tinggi, yaitu 400 ppm. Kemampuan kedua isolat tersebut untuk tetap menyisihkan lebih dari 80% Pb menunjukkan adanya mekanisme adaptasi yang efektif terhadap tekanan logam berat. Sedimen sebagai sumber isolat tersebut diketahui mengakumulasi logam berat yang teradsorpsi pada partikel organik maupun mineral dan kemudian mengendap. Akibatnya, bakteri sedimen terpapar logam berat dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan bakteri di kolom air. Kondisi tersebut diduga mendorong terjadinya seleksi alami terhadap mikroorganisme yang memiliki sistem adaptasi dan detoksifikasi logam yang lebih efektif.

Dari perspektif lingkungan dan kesehatan masyarakat, kemampuan penyisihan Pb oleh isolat TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3 berpotensi mendukung upaya pengendalian pencemaran logam berat di wilayah pesisir. Penurunan konsentrasi Pb terlarut berpotensi mengurangi ketersediaan logam bagi organisme akuatik dan membatasi peluang masuknya Pb ke dalam rantai makanan. Hal ini relevan bagi perlindungan ekosistem pesisir sekaligus pencegahan risiko kesehatan manusia akibat paparan Pb melalui konsumsi biota yang terkontaminasi. Namun, manfaat tersebut

masih bersifat potensial karena penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium dan belum mengevaluasi perubahan bioavailabilitas Pb, akumulasi Pb pada biota, maupun paparan pada manusia. Oleh karena itu, pengembangan kedua isolat sebagai agen bioremediasi perlu dilanjutkan melalui pengujian pada kondisi perairan yang lebih representatif untuk memastikan efektivitas penyisihan Pb serta keamanannya bagi ekosistem.

Karakterisasi Isolat Bakteri Toleran Pb

Kelima isolat terbaik dikarakterisasi secara makroskopis, mikroskopis, dan biokimia untuk mengetahui ciri fenotipiknya. Hasil karakterisasi disajikan pada Tabel 6, sedangkan morfologi koloni dan hasil pewarnaan Gram ditunjukkan pada Gambar 4. Secara makroskopis, seluruh isolat membentuk koloni circular dengan tepian entire dan elevasi convex. Ciri ini menunjukkan pola pertumbuhan koloni yang teratur dan aktif, yang umum ditemukan pada bakteri heterotrof dari lingkungan perairan laut dan sedimen tercemar logam berat.^{36,23}

Empat isolat, yaitu TJA 1.3.1, TJA 3.3.2, TJS 2.6.3, dan TJS 3.6.2, termasuk bakteri Gram-negatif dengan bentuk sel coccobacillus atau basil, sedangkan PSS 2.6.1 merupakan bakteri Gram-positif berbentuk coccus. Dominasi bakteri Gram negatif pada lingkungan tercemar logam berat menunjukkan bahwa kelompok bakteri ini memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap tekanan logam berat, terutama karena keberadaan membran luar yang mengandung lipopolisakarida (LPS) sebagai penghalang masuknya ion logam ke dalam sel.^{27,37} Warna koloni juga bervariasi, mulai dari putih susu, putih translusen, hingga krem kekuningan, yang mencerminkan perbedaan metabolisme dan produksi pigmen antarisolat.^{38,39}

Berdasarkan hasil uji biokimia, seluruh isolat menunjukkan reaksi katalase positif, MR positif, VP negatif, serta tidak menghasilkan H₂S maupun indol. Sebagian besar isolat menunjukkan reaksi TSIA K/A yang menandakan kemampuan memfermentasi glukosa, sedangkan sebagian lainnya menunjukkan reaksi A/A yang mengindikasikan kemampuan memfermentasi lebih dari satu jenis gula. Hasil uji sitrat dan motilitas menunjukkan adanya variasi karakter fisiologis antar isolat. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa bakteri memiliki kemampuan metabolisme yang beragam dan diduga berperan dalam adaptasi terhadap cekaman logam berat, termasuk melalui mekanisme pertahanan terhadap stres oksidatif dan pembentukan biofilm.^{23,28,34,37}

Tabel 6. Hasil pengamatan morfologi dan uji biokimia isolat bakteri toleran Pb

Karakteristik	Isolat				
	TJA 1.3.1	TJA 3.3.2	TJS 2.6.3	TJS 3.6.2	PSS 2.6.1
Morfologi					
Bentuk koloni	Circular	Circular	Circular	Circular	Circular
Warna koloni	Putih susu	Putih translusen	Putih susu	Putih susu	Krem kekuningan
Tepian koloni	Entire	Entire	Entire	Entire	Entire
Elevasi koloni	Convex	Convex	Convex	Convex	Convex
Bentuk sel	Coccobacillus	Coccobacillus	Basil	Basil	Coccus
Gram	–	–	–	–	+
Uji Biokimia					
TSIA (gula)	K/A	K/A	K/A	K/A	A/A
Gas	+	+	–	–	–
Katalase	+	+	+	+	+
Motilitas	–	+	–	+	–
H ₂ S	–	–	–	–	–
Indol	–	–	–	–	–
MR	+	+	+	+	+
VP	–	–	–	–	–
Sitrat	+	+	–	–	–

Keterangan:

K/K = Alkali/alkali, tidak terjadi fermentasi karbohidrat, pepton dikatabolisme.

K/A = Alkali/asam, hanya glukosa yang difermentasi.

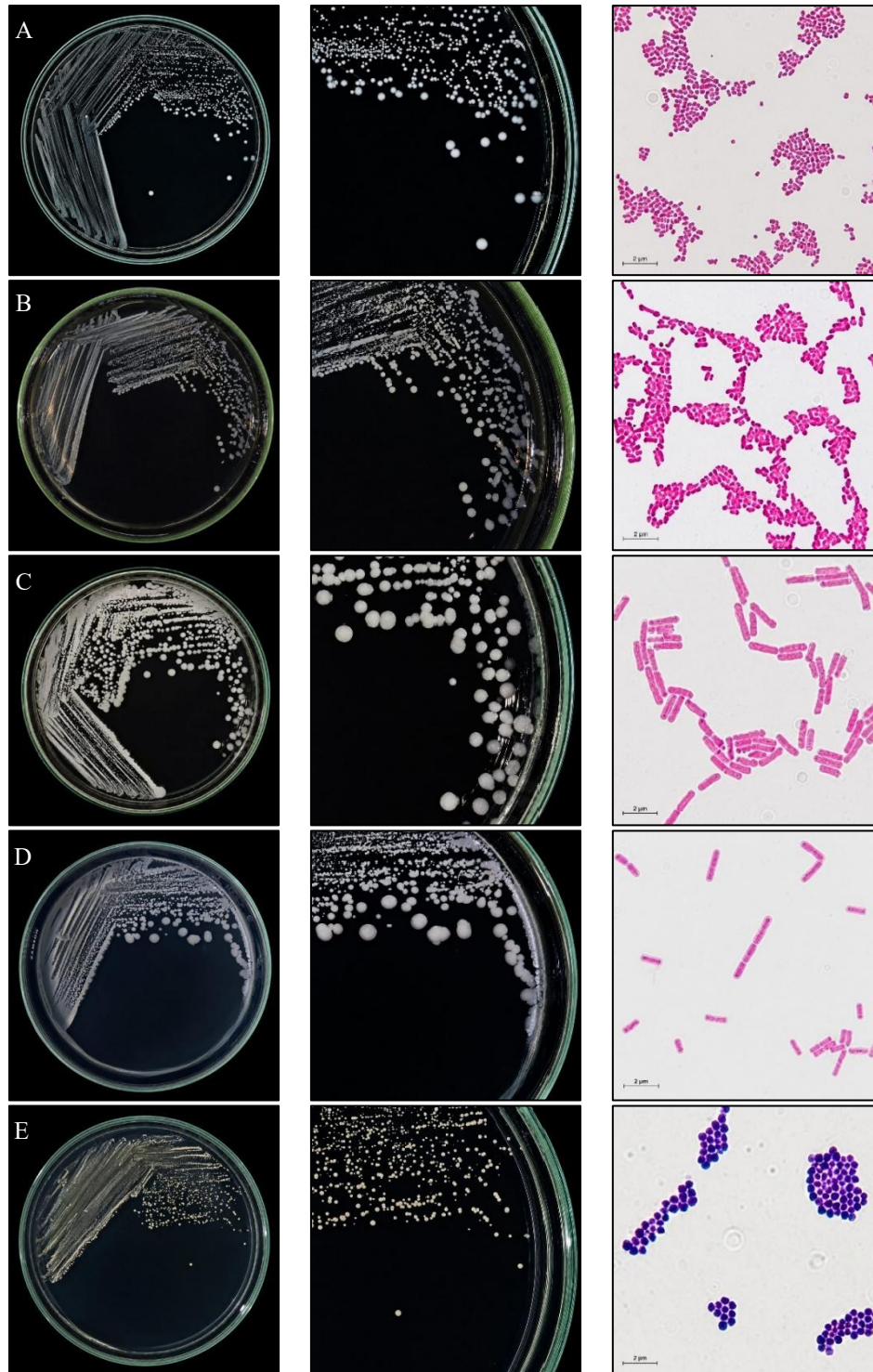
A/A = Asam/asam, glukosa dan laktosa atau sukrosa difermentasi.

(+) = Positif.

(–) = Negatif.

Pola biokimia yang diperoleh juga sejalan dengan temuan Fahrudin (2020) melaporkan dominasi bakteri Gram negatif toleran Pb dari perairan Pelabuhan Paotere, Makassar.³⁶ Berbagai jenis bakteri laut toleran logam berat dari sedimen pesisir seperti genus *Enterobacter*, *Citrobacter*, dan *Staphylococcus* dilaporkan memiliki kemampuan toleransi serta potensi bioremediasi Pb yang tinggi dengan karakteristik fisiologis yang serupa dengan isolat pada penelitian ini.^{23,34,38,39} Kesesuaian karakteristik tersebut menunjukkan bahwa bakteri indigenus yang diisolasi dari perairan Batam memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai kandidat agen bioremediasi logam berat di lingkungan pesisir.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Identifikasi isolat hanya dilakukan berdasarkan karakter morfologi dan biokimia sehingga belum dikonfirmasi melalui analisis molekuler gen 16S rRNA. Selain itu, analisis gen resistensi Pb serta optimasi kondisi bioremediasi, meliputi pH, suhu, waktu inkubasi, dan biomassa bakteri, belum dilakukan. Pengujian juga masih terbatas pada skala laboratorium sehingga efektivitas isolat pada kondisi lingkungan sebenarnya masih memerlukan penelitian lebih lanjut.



Gambar 4. Morfologi koloni dan hasil pewarnaan Gram isolat bakteri toleran Pb pada medium NA: (A) TJA 1.3.1, (B) TJA 3.3.2, (C) TJS 2.6.3, (D) TJS 3.6.2, dan (E) PSS 2.6.1.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengisolasi bakteri indigenous dari Perairan Batam yang toleran terhadap Pb. Isolat TJS 3.6.2 dan TJS 2.6.3 menunjukkan potensi paling tinggi sebagai agen bioremediasi Pb karena mampu bertahan hingga konsentrasi Pb 800 ppm dan menyisihkan Pb dengan efisiensi masing-masing sebesar 86,85% dan 84,56%. Temuan ini menunjukkan bahwa sedimen perairan Batam merupakan sumber potensial bakteri indigenous yang memiliki kemampuan toleransi dan penyisihan Pb sehingga berpotensi dimanfaatkan dalam pengembangan teknologi bioremediasi logam berat di lingkungan pesisir. Penelitian ini memberikan informasi awal mengenai potensi bakteri lokal sebagai agen bioremediasi, yang dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan melalui identifikasi molekuler, optimasi kondisi bioremediasi, serta pengujian pada skala lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Putra MDN, Sugeng W, Warsito A. Studi Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Pada Sedimen Dasar Perairan Banjir Kanal Timur Semarang. *Indonesia Journal of Oceanography*. 2022;04(03):13-21. <https://doi.org/10.14710/ijoc.v4i3.13398>
2. Romdhonia NF, Pujiati RS, Ningrum PT. Analisis Kandungan Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Ikan Belanak di Wilayah Industri Pesisir Kecamatan Manyar dan Gresik. *Ikesma*. 2023;19(3):211. <https://doi.org/10.19184/ikesma.v19i3.38926>
3. Salsabilla RO, Pratama B, Angraini DI. Kadar Timbal Darah Pada Kesehatan Anak. *Jurnal Penelitian Perawat Profesional*. 2020;2(2):119-24. <https://doi.org/10.37287/jppp.v2i2.54>
4. Jiang X, Kirsten KL, Qadeer A. Contaminants in the Water Environment: Significance from the Perspective of the Global Environment and Health. *Water*. 2025;17(9):1259. <https://doi.org/10.3390/w17091257>
5. Abubakar MY, Ahmad KB, Mathew TS, Shamsudden R, Muhammad HM, Haladu M, Adam M. Heavy Metal Pollution in Aquatic Ecosystems: A Review of Toxic Impacts and Remediation Strategies. *Kwaghe International Journal of Sciences and Technology*. 2024;1(1):75-86. <https://doi.org/10.58578/kijst.v1i1.3621>
6. Syafriliansah MW, Tarzan P. Kadar Logam Berat Timbal (Pb) Tumbuhan Akuatik dan Air sebagai Indikator Kualitas Air Sungai Brangkal. Mojokerto. *LenteraBio*. 2022;11(2):341-350. <https://doi.org/10.26740/lenterabio.v11n2.p341-350>
7. Kusumadiani TA, Redjeki S, Yulianto B. Kajian Tingkat Timbal (Pb) di Perairan Pantai Semarang: Studi Kasus pada Kerang Darah. *Journal of Marine Research*. 2024;13(3):502-510. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i3.39367>
8. Amelia F, Ismarti I, Ramses R, Rozirwan R. Biokonsentrasi Faktor Logam Berat pada Kerang dari Perairan Batam, Kepulauan Riau, Indonesia. *EduChemia (Jurnal Kimia dan Pendidikan)*. 2019;4(2):152. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v4i2.5529>
9. Iimarti S, Amelia F, Ramses R. Kandungan Logam Berat Pb dan Cd pada Sedimen dan Kerang di Perairan Batam. *Jurnal Dimensi*. 2016;4(3). <https://doi.org/10.33373/dms.v4i3.45>
10. Vitasari V, Suryanti A, Lestari F, Muzahar M, Syaefullah, S. Distribusi Kandungan Logam Berat Pb Pada Ekosistem Perairan Kepri. *Jurnal Ekologi, Masyarakat dan Sains*. 2022;4(1):27-37. <https://doi.org/10.55448/ems.v4i1.73>
11. Gouda SA, Taha A. Biosorption of Heavy Metals as a New Alternative Method for Wastewater Treatment: A Review. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2023;27(2):135-153. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2023.291671>
12. Leka ESK, Cahyadi TA, Nurkhamim N, Ernawati R, Winarno E. Overview Metode Fitoremediasi dalam Pengelolaan air Tercemar Timbal (Pb). *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*. 2024;9(1):31-7. <https://doi.org/10.33084/mitl.v9i1.6372>
13. Kumar K, Singh D. Bioremediation Potential of Cadmium-Resistant Bacteria Isolated from Water Samples of Rivulet Holy Kali Bein, Punjab, India. *Bioremediation Journal* 2024;28(4):399-420. <https://doi.org/10.1080/10889868.2023.2281450>
14. Nnaji ND, Anyanwu CU, Miri T, Onyeaka H. Mechanisms of Heavy Metal Tolerance in Bacteria: A Review. *Sustainability*. 2024;16(24):11124. <https://doi.org/10.3390/su162411124>
15. Rahadi B, Liliya DS, Rinda A. Bioremediasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Bakteri Indigenous Pada Tanah Tercemar Air Lindi (Leachate). *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 2019;6(3):11-18. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2019.006.03.2>
16. Agustina CST, Lisa L. Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Pendegradasi Logam Timbal (Pb) di Perairan Teluk Lamong Surabaya. *LenteraBio*. 2023;12(1):101-106. <https://doi.org/10.26740/lenterabio.v12n1.p101-106>
17. Nursyirwani N, Yoswaty D. Isolation and Identification of Bacteria from Dumai Marine Waters that Have Potencial as Lead Bioremediation Agents. *Journal of Coastal and Ocean Sciences* 2021;2(3):217-222. <https://doi.org/10.31258/jocos.2.3.217-222>
18. Ramses. Studi Bioekologi Siput Gonggong (*Laevistrombus canarium* Linnaeus, 1758) dan Pemanfaatan Ramah Lingkungan di Kota Batam. Disertasi. Universitas Riau; 2023.

19. Rigoletto M, Calza P, Gaggero E, Malandrino M, Fabbri D. Bioremediation Methods for the Recovery of Lead-Contaminated Soils: A Review. *Applied Sciences*. 2020;10(10):3528. <https://doi.org/10.3390/app10103528>
20. Naik MM, Dubey SK. Lead-Resistant Bacteria: Lead Resistance Mechanisms, Their Applications in Lead Bioremediation and Biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013;98:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.039>
21. Alvarado-Campo KL, Quintero M, Cuadrado-Cano B, Montoya-Giraldo M, Otero-Tejada EL, Blandón L, et al. Heavy Metal Tolerance of Microorganisms Isolated from Coastal Marine Sediments and Their Lead Removal Potential. *Microorganisms*. 2023;11(11):2708. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112708>
22. Naik MM, Kumar Dubey S, Khanolkar D. P-type ATPase and MdrL Efflux Pump-Mediated Lead and Multi-Drug Resistance in Estuarine Bacterial Isolates. *Current Science*. 2013;105(10):1366-1372.
23. Fahrudin F, Haerda NHN, Santoso S, Wahyuni S. Uji Kemampuan Tumbuh Isolat Bakteri dari Air dan Sedimen Sungai Tallo Terhadap Logam Timbal (Pb). *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*. 2019;10(2):58-64. <https://doi.org/10.20956/JAL.V10I2.7762>
24. Wang S, Liu T, Xiao X, Luo S. Advances in Microbial Remediation for Heavy Metal Treatment: A Mini Review. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2021;3(1)1. <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00042-z>
25. Shan B, Hao R, Zhang J, Li J, Ye Y, Lu A. Microbial Remediation Mechanisms and Applications for Lead-Contaminated Environments. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2022;39(2):38. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03484-1>
26. Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Heavy Metal Pollution in the Environment and Their Toxicological Effects on Humans. *Heliyon*. 2020;6(9):e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
27. De Fretes CE, Sutiknowati LI, Falahudin D. Isolasi dan Identifikasi Bakteri Toleran Logam Berat dari Sedimen Mangrove di Pengudang dan Tanjung Uban, Pulau Bintan, Indonesia. *Oceanologi dan Limnologi di Indonesia*. 2019;4(2):71. <https://doi.org/10.14203/oldi.2019.v4i2.244>
28. Ghosh A, Rai J, Sah D, Chakraborty M. Isolation and Characterization of Lead (PB) Tolerant Bacterial Isolate And Its Potential for Bioremediation of Contaminated Soil. *The Pharma Innovation Journal*. 2022;11(5): 1896-900. <https://www.thepharmajournal.com>
29. Chandana N, Laxmi KDS, P. Reddy PHP, Narasimhulu K. Studies on Bioremediation of Lead by Lead-resistant Microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*. 2016;4(5):88-92. <https://doi.org/10.12691/jaem-4-5-1>
30. Naik MM, Pandey A, Dubey SK. Biological Characterization of Lead-Enhanced Exopolysaccharide Produced by A Lead-Resistant Enterobacter cloacae Strain P2B. *Biodegradation*. 2012(5):775-83. <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9552-y>
31. Naik MM, Pandey A, Dubey SK. Pseudomonas aeruginosa Strain WI-1 from Mandovi Estuary Possesses Metallothionein to Alleviate Lead Toxicity and Promotes Plant Growth. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012;79:129-33. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.12.015>
32. Kumar K, Singh D. Isolation, Characterization and Optimization of Lead-Resistant Bacteria and Possible Application in Bioremediation. *Indian Journal of Microbiology*. 2025;65(2):1105-1120. <https://doi.org/10.1007/s12088-025-01472-1>
33. Prasidya DA, Sa'adah N, Aniriani GW, Wicaksono RR. Isolasi dan Penapisan Bakteri yang Resisten terhadap Logam Pb (Timbal) dari Air Tambak Sekitar Bekas Pabrik Peleburan Aki di Pucuk, Lamongan. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*. 2025;16(2):54-60. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v16i2.375>
34. Fahrudin F, Santosa S. Toleransi Logam Berat Timbal (Pb) pada Bakteri Indigenous dari Air Laut Pelabuhan Paotere, Makasar. *Aquatic Science & Management*. 2020;8(1):8-14. <https://doi.org/10.35800/jasm.8.1.2020.29572>
35. Mitra A, Chatterjee S, Kataki S, Rastogi RP, Gupta DK. Bacterial Tolerance Strategies Against Lead Toxicity and Their Relevance in Bioremediation Application. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(12):14271-14284. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12583-9>
36. Oziegbe O, Oluduro AO, Oziegbe EJ, Ahuekwe EF, Olorunsola SJ. Assessment of Heavy Metal Bioremediation Potential of Bacterial Isolates from Landfill Soils. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2021;28(7):3948-3956. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.072>
37. Idrees M, Ali S, Rehman A, Zajif Hussain S, Abbas Bukhari D. Uptake of Lead by Bacteria Isolated from Industrial Effluents and Their Potential Use in Bioremediation of Wastewater. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2023;30(8):103740. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103740>