

Studi Perbandingan Akumulasi Besi (Fe) oleh Beberapa Spesies Mangrove di Perairan Bangkalan, Selat Madura

Jihannuma Adibiah Nurdini, Aginda Sahara*, Wakhidatun Nafisyah Aljamilah

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Trunodjoyo Madura

Jl. Raya Telang PO BOX 2, Kamal - Bangkalan, Jawa Timur 69162 Indonesia

Corresponding author, e-mail: agindasahara@gmail.com

ABSTRAK: Mangrove mempunyai kemampuan sebagai biofilter alami yang dapat menyerap dan mengakumulasi logam berat melalui mekanisme fitoremediasi. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan akumulasi dan distribusi besi (Fe) pada beberapa jenis mangrove di Perairan Martajasah, Bangkalan, serta mengevaluasi potensi fitoremediasi. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan perbandingan antara spesies mangrove dengan integrasi sedimen, akar, daun menggunakan parameter biokonsentrasi (BCF) dan faktor translokasi (TF), yang masih terbatas untuk logam esensial seperti Fe di wilayah perairan Bangkalan. Konsentrasi Fe tertinggi ditemukan pada sedimen dari spesies *Aegiceras corniculatum* 17,32 mg/kg, diikuti oleh akar pada spesies *Aegiceras corniculatum* 14,81 mg/kg, dan daun pada spesies *Rhizophora mucronata* 5,64 mg/kg. *Sonneratia alba*, *Xylocarpus moluccensis*, dan *Aegiceras corniculatum* menunjukkan faktor biokonsentrasi tertinggi yaitu 0,86 mg/kg yang menandakan spesies tersebut kurang berpotensi dalam mengakumulasi logam berat Fe, sedangkan *Rhizophora apiculata* menunjukkan faktor translokasi tertinggi yaitu 0,50 mg/kg, yang menandakan spesies tersebut berpotensi kecil dalam memindahkan logam berat dari akar menuju daun. Interpretasi fitoremediasi dibatasi pada mekanisme akumulasi dan distribusi logam. Faktor lain seperti toleransi fisiologis, laju pertumbuhan, dan kondisi lingkungan belum dianalisis secara kuantitatif. Oleh karena itu, hasil ini merupakan informasi awal dan tidak merepresentasikan efektivitas fitoremediasi secara menyeluruh.

Kata kunci: Mangrove; Fitoremediasi; Logam Berat; Besi; Bangkalan

Comparative Study of Iron (Fe) Accumulation by Several Mangrove Species in Bangkalan Seawaters, Madura Strait

ABSTRACT: Mangroves act as natural biofilters capable of absorbing and accumulating heavy metals through phytoremediation mechanisms. This study aims to compare the accumulation and distribution of iron (Fe) in several mangrove species in the Martajasah Waters, Bangkalan, and to evaluate their phytoremediation potential. The novelty of this study lies in the comparative approach between mangrove species, integrating sediment, roots, and leaves using bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) parameters, which remain limited for essential metals such as Fe in the Bangkalan waters. The highest Fe concentration was found in the sediment of the *Aegiceras corniculatum* species at 17.32 mg/kg, followed by the roots of the *Aegiceras corniculatum* species at 14.81 mg/kg, and the leaves of the *Rhizophora mucronata* species at 5.64 mg/kg. *Sonneratia alba*, *Xylocarpus moluccensis*, and *Aegiceras corniculatum* exhibited the highest bioconcentration factor of 0.86 mg/kg, indicating that these species have limited potential for accumulating Fe, whereas *Rhizophora apiculata* exhibited the highest translocation factor of 0.50 mg/kg, indicating that this species has limited potential for transporting heavy metals from roots to leaves. The interpretation of phytoremediation is limited to the mechanisms of metal accumulation and distribution. Other factors such as physiological tolerance, growth rate, and environmental conditions have not yet been quantitatively analyzed. Therefore, these results constitute preliminary information and do not represent.

Keywords: Mangrove; Phytoremediation; Heavy Metal; Bangkalan

PENDAHULUAN

Perairan pesisir mempunyai peran penting bagi aktivitas ekonomi, sosial, serta ekologi, selain itu juga dapat berfungsi sebagai penyangga ekosistem dan sumber daya bagi masyarakat (Naibaho *et al.*, 2023). Namun, dengan meningkatnya aktivitas antropogenik seperti pembuangan limbah rumah tangga, industri, pertambangan serta kegiatan pelabuhan menyebabkan meningkatnya potensi pencemaran laut (El-Sharkawy *et al.*, 2025). Salah satu cemaran atau polutan yang berbahaya dan beracun untuk lingkungan laut adalah logam berat (Zaynab *et al.*, 2022). Adanya kandungan beberapa logam berat pada air dan sedimen di selat Madura telah ditemukan oleh beberapa peneliti (Nurdini *et al.*, 2024; Afifudin *et al.*, 2025), salah satunya besi (Fe). Meskipun logam ini diperlukan dalam jumlah kecil sebagai unsur hara, juga dapat menyebabkan toksik apabila terakumulasi dalam konsentrasi tinggi pada air, sedimen, serta organisme laut (Afifudin *et al.*, 2024). Logam berat yang terakumulasi pada biota laut dapat berlanjut ke rantai makanan hingga berakhir sebagai bahan konsumsi manusia (Briffa *et al.*, 2020).

Wilayah pesisir Madura, khususnya pada daerah Bangkalan, padat akan aktivitas antropogenik seperti kegiatan industri, pelabuhan, dan perikanan sehingga dapat meningkatkan potensi cemaran logam berat di perairan, baik pada air laut dan sedimen Hur *et al.*, (2020). Menindaklanjuti kondisi tersebut, penting adanya pengendalian pencemaran logam berat melalui pemanfaatan vegetasi alami, salah satunya yaitu mangrove, yang mempunyai kemampuan dalam fitoremediasi dan biofilter alami. Mangrove tidak hanya dikenal sebagai pelindung pantai dari abrasi, tetapi juga sebagai tumbuhan yang bisa menyerap atau mengurangi polutan dari lingkungan (Ilhami dan Nurdini, 2024; Rahman *et al.*, 2022). Akar dari mangrove dapat menyerap logam berat seperti besi (Fe), jadi dapat mengurangi pencemaran di perairan. Beberapa penelitian menunjukkan adanya kemampuan penyerapan logam berat yang oleh tumbuhan mangrove, baik penyerapan oleh satu jenis mangrove (Nurdini *et al.*, 2025) maupun dari perbandingan serapan logam berat berbagai variasi spesies mangrove.

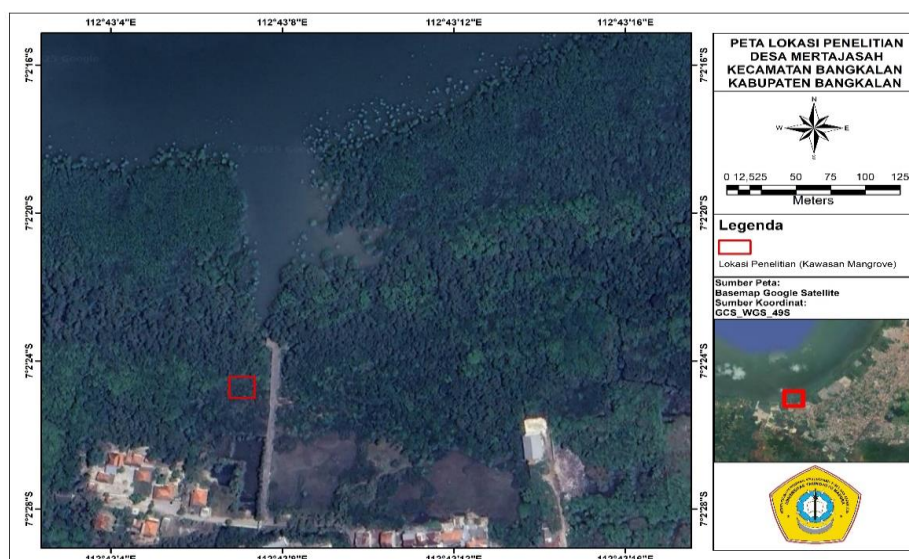
Penelitian mengenai kemampuan mangrove dalam penyerapan logam berat besi (Fe) yang ada di wilayah Madura, khususnya yang berada di Bangkalan atau sekitar Selat Madura, masih tergolong terbatas. Padahal, ekosistem mangrove pada kawasan ini sangat luas dan memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai upaya pengelolaan lingkungan berbasis ekosistem. Adapun wilayah Madura juga berbatasan dengan lingkungan industri seperti galangan kapal, pelabuhan kapal, bongkar muat dan berbagai aktivitas pelayaran. Studi-studi sebelumnya umumnya lebih berfokus pada logam berat yang bersifat sangat toksik seperti Pb, Cd, dan Hg, sementara kajian terhadap Fe masih relatif jarang dilakukan (Indirawati, 2017). Padahal, Fe memiliki karakteristik unik sebagai unsur esensial yang dibutuhkan organisme dalam jumlah tertentu, namun dapat bersifat toksik pada konsentrasi tinggi akibat pengaruh proses alami dan aktivitas antropogenik (Harish *et al.*, 2023). Selain itu, penelitian terdahulu umumnya masih terbatas pada pengaruh konsentrasi logam pada bagian tertentu tanaman, tanpa mengkaji distribusinya secara menyeluruh pada akar dan daun, serta belum banyak yang menganalisis dalam mekanisme akumulasi melalui parameter biokonsentrasi (BCF) dan translokasi (TF) secara bersamaan. Selain itu, perbandingan kemampuan antar spesies mangrove dalam mengakumulasi Fe juga masih jarang dilakukan, khususnya pada ekosistem mangrove di wilayah Bangkalan. Oleh karena itu penelitian ini memiliki kebaruan dengan mengkaji distribusi logam Fe secara menyeluruh pada bagian tanaman mangrove dan sedimen, serta menganalisis kemampuan akumulasi dan translokasinya menggunakan pendekatan BCF dan TF secara bersamaan. Sehingga, penelitian ini tidak hanya melengkapi keterbatasan data terkait kontaminasi Fe di wilayah Bangkalan, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah dalam mengidentifikasi potensi spesies mangrove sebagai agen biofilter yang efektif dalam pengelolaan lingkungan pesisir. Pemilihan logam Fe dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik sebagai logam berat esensial yang berbeda dengan logam berat non-esensial seperti Pb, Cd, dan Hg (Putri *et al.*, 2024). Fe dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah tertentu untuk mendukung proses fisiologis seperti fotosintesis dan aktivitas enzim, namun dapat bersifat toksik apabila terakumulasi dalam konsentrasi tinggi. Berbeda dengan Pb, Cd, dan Hg yang cenderung bersifat toksik dan tidak memiliki mekanisme penyerapan dan distribusi yang lebih kompleks dalam

jaringan tanaman, oleh karena itu, penelitian terhadap Fe menjadi penting untuk memahami tidak hanya aspek pencemaran, tetapi juga interaksi biologis dan potensi adaptasi mangrove terhadap logam berat esensial.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan materi sampel sedimen, akar, daun mangrove yang diambil dari perairan Bangkalan, untuk pengujian kandungan logam berat (Fe). Bersamaan dengan pelaksanaan kegiatan pengambilan sampel di lapang juga dilakukan pengukuran parameter lingkungan perairan secara *in situ* meliputi suhu, kandungan oksigen terlarut (DO), dan pH tanah (Maulina *et al.*, 2024). Pengukuran parameter lingkungan bertujuan untuk mengetahui kondisi lingkungan perairan yang mempengaruhi ketersediaan dan mobilitas Fe di ekosistem mangrove (Pratama *et al.*, 2023). Suhu berperan dalam mempengaruhi laju reaksi kimia dan kelarutan Fe di perairan, sehingga dapat mempengaruhi ketersediaannya. Kandungan oksigen terlarut (DO) berkaitan dengan kondisi redoks yang menentukan bentuk kimia Fe, dimana pada kondisi rendah oksigen (anaerob) Fe cenderung berada dalam bentuk terlarut (Fe^{2+}) yang lebih mudah diserap oleh tanaman, sedangkan pada kondisi oksigen tinggi Fe akan teroksidasi menjadi bentuk tidak larut (Fe^{3+}). Sementara itu, pH tanah mempengaruhi kelarutan dan kestabilan Fe, dimana kondisi asam meningkatkan kelarutan Fe, sedangkan kondisi basa cenderung mengendapkan Fe. Meskipun demikian lingkungan tersebut tidak diintegrasikan secara langsung dalam analisis kuantitatif karena penelitian ini difokuskan pada pengukuran konsentrasi Fe serta kemampuan akumulasi dan translokasinya berdasarkan nilai BCF dan TF. Data parameter lingkungan digunakan sebagai informasi pendukung untuk menjelaskan kondisi lokasi penelitian dan membantu interpretasi variasi konsentrasi Fe yang diperoleh, bukan sebagai variabel utama yang dianalisis secara statistik.

Pengambilan sampel dilakukan pada bulan September 2025. Sampel akar dan daun mangrove, serta sedimen diambil pada 1 stasiun penelitian. Desa Martajasah dipilih sebagai lokasi penelitian karena kawasan ini merupakan salah satu wilayah pesisir yang masih memiliki vegetasi mangrove alami sekaligus berdekatan dengan area aktivitas antropogenik, seperti pelabuhan, permukiman padat, serta aktivitas perikanan dan industri kecil. Kondisi tersebut menjadikan Martajasah sebagai lokasi representatif untuk menilai potensi akumulasi logam berat Fe akibat pengaruh aktivitas manusia terhadap lingkungan pesisir, selain itu kawasan Martajasah juga memiliki keragaman jenis mangrove yang cukup tinggi sehingga mendukung perolehan sampel beberapa spesies mangrove. Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Titik Sampling Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif (Pratama dan Isroni, 2025), yaitu dengan melakukan analisis laboratorium pada konsentrasi logam berat besi (Fe) dengan sampel akar, daun, dan sedimen dari beberapa jenis mangrove yang berada di wilayah pesisir Martajasah Bangkalan. Pengambilan sampel dilakukan pada 1 stasiun. Penelitian ini menganalisis kandungan logam berat besi (Fe) pada daun, akar, dan sedimen dari 7 spesies pohon mangrove yang terdiri dari 7 sampel daun, 7 sampel akar, dan 7 sampel sedimen sehingga total keseluruhan 21 sampel. Metode pengambilan sampel yang digunakan adalah purposive sampling, yaitu penentuan lokasi secara sengaja berdasarkan karakteristik lingkungan yang mewakili kondisi vegetasi mangrove serta kedekatannya dengan aktivitas antropogenik. Lokasi penelitian berada pada koordinat 7°02'40.31"S 112°43'05.19"E Pendekatan ini bertujuan untuk melihat perbandingan kemampuan beberapa jenis mangrove dalam penyerapan logam berat besi (Fe) sebagai fitoremediator dan biofilter alami.

Sampel yang telah didapat kemudian dipreparasi. Sampel sedimen, akar, dan daun mangrove dibersihkan dengan air yang mengalir, selanjutnya dikeringkan di dalam oven dengan suhu 80° C selama 24-48 jam. Sampel yang sudah dikeringkan kemudian dihaluskan menggunakan grinder hingga menjadi halus dan ditimbang masing-masing sampel $\pm$ 1 gram. Proses destruksi sampel dilakukan dengan menggunakan metode digesti basah (*wet digestion*) berdasarkan buku prosedur analisis tanaman yang disusun oleh Plank (1992) dan Kalra (1998). Masing-masing 1 gram sampel kering dimasukkan ke dalam gelas beaker berukuran 50 ml, selanjutnya ditambahkan larutan asam HNO₃ sebanyak 5 ml, kemudian dipanaskan di atas *hot plate* dengan suhu 125°C hingga reaksi berkurang dan sebagian besar bahan organik terurai, pemanasan dijaga supaya tidak mendidih keras atau kering. Selanjutnya sampel didinginkan. Setelah dingin, dilakukan pengulangan pemanasan sampel pada suhu 125°C, bersamaan dengan itu pada sampel ditambahkan sejumlah H₂O₂ 30% secara hati-hati, hingga larutan jernih. Setelah sampel terdigest jernih, kaca arloji diangkat dan suhu diturunkan hingga 80°C. Pemanasan dilanjutkan hingga hampir kering. Residu akan berwarna jernih atau putih jika proses digest telah selesai. Tambahkan 2 ml HNO₃ dan air deionisasi 10 ml pada gelas beaker untuk melarutkan residu digesti. Bilasan ini kemudian dipindahkan dan saring ke labu ukur 50 ml. Terakhir yaitu pengenceran sampel dengan pemberian air deionisasi hingga tanda batas 50 ml. Setelah seluruh tahapan preparasi selesai dilakukan, sampel akan diuji konsentrasi logam berat besi (Fe). Konsentrasi logam berat besi (Fe) pada masing-masing sampel (akar, daun, dan sedimen) dianalisis menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil pengukuran kemudian dinyatakan dalam satuan mg/kg atau ppm.

Analisis hiperakumulator berfokus pada kemampuan tanaman tertentu yang dapat menyerap logam berat yang mengandung toksitas, dalam analisis ini parameter yang sering diukur meliputi konsentrasi logam berat dalam akar dan daun (Widyasari, 2021). Tanaman hiperakumulator memiliki konsentrasi logam berat besi (Fe) yang berada dalam jaringan daun, akar, dan sedimen (Priantoro *et al.*, 2025). Faktor biokonsentrasi (BCF) digunakan untuk mengukur kadar logam berat dalam suatu organisme, sementara itu faktor translokasi (TF) menunjukkan kemampuan tanaman untuk memindahkan logam dari tanah ke bagian-bagian tanaman lainnya (Samosir *et al.*, 2023). Persamaan BCF dan TF pada persamaan (1) dan (2) yang umum digunakan pada konteks fitoremediasi dicetuskan oleh Baker & Brooks (1989), Zayed & Terry (2003), dan MacFarlane *et al.*, (2007). BCF berfungsi untuk menilai kemampuan suatu organisme, seperti tanaman atau biota dalam mengakumulasi logam berat dari substrat atau sedimen. Jika nilai BCF >1, maka organisme tersebut memiliki potensi sebagai hiperakumulator, yang menandakan organisme bisa menyerap logam berat dari lingkungan sekitar. Sementara TF diukur dari rasio konsentrasi logam pada bagian daun dibandingkan dengan konsentrasi pada akar. Jika nilai TF >1, maka tanaman tersebut dinilai mampu melakukan translokasi logam berat secara efektif dari akar. Studi ini penting dalam bidang fitoremediasi, yaitu pemanfaatan tanaman untuk memulihkan lahan tercemar logam berat dengan metode yang ramah lingkungan ((Mentari *et al.*, 2022; Mbaba, 2024 ; Sari *et al.*, 2019).

$$BCF = \frac{C_{akar / daun}}{C_{Sedimen}} \dots\dots\dots (1)$$

$$TF = \frac{BCF_{Daun}}{BCF_{Akar}} \dots\dots\dots(2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis kandungan logam besi (Fe) pada sampel sedimen, akar, dan daun dari beberapa jenis mangrove dari lokasi penelitian di desa Martajasah, kabupaten Bangkalan didapatkan dari pengujian dengan menggunakan instrument *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) di laboratorium terpadu Universitas Trunojoyo Madura, selengkapnya diilustrasikan dengan grafik Gambar 2. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kandungan besi (Fe) beberapa jenis mangrove menunjukkan adanya variasi pada sampel sedimen, akar, dan daun. Konsentrasi besi (Fe) tertinggi ditemukan pada sedimen dengan rentang nilai antara 15,20 mg/kg hingga 17,32 mg/kg yang menandakan bahwa logam berat secara dominan terakumulasi pada sedimen. Logam berat memiliki massa jenis yang lebih tinggi dibanding massa jenis air laut sehingga cenderung tenggelam kemudian mengendap dan terakumulasi di sedimen dari waktu ke waktu. Konsentrasi logam berat pada sedimen tertinggi pada spesies *Avicennia marina* dengan nilai 16,99 mg/kg, sedangkan terendah pada *Rhizophora apiculata* dengan nilai 15,20 mg/kg. Adanya perbedaan konsentrasi logam berat pada sedimen beberapa jenis mangrove disebabkan tipe akar dan zona perakaran yang berbeda tiap jenisnya. Tipe akar dan zona perakaran sangat mempengaruhi aerasi sedimen, aktivitas mikroba, redoks potensial, dan distribusi bahan organik. Misalnya pada *Rhizophora* sp. yang memiliki akar tunjang, bentuk akarnya memiliki keterbatasan kontak langsung dengan sedimen sehingga aerasi rendah, karena itu logam berat cenderung berbentuk sulfida dan memiliki mobilitas yang rendah).

Pada bagian akar memiliki kandungan Fe yang bervariasi mulai dari terendah 5,71 mg/kg pada *Rhizophora apiculata* hingga 14,81 mg/kg pada *Aegiceras corniculatum*. Hal ini menunjukkan variasi kemampuan beberapa jenis mangrove dalam menyerap dan mengakumulasi logam besi (Fe) dari sedimen ke jaringan akar. Adanya perbedaan kemampuan penyerapan logam berat dari sedimen ke akar mangrove antar jenis mangrove disebabkan oleh kombinasi faktor fisiologis, morfologis, dan lingkungan mikro di sekitar akar. Studi Mahmudi *et al.*, (2021) dan MacFarlene *et al.*, (2007) menemukan bahwa mangrove jenis *Rhizophora* spp. dengan bentuk akar tunjang memiliki kemampuan akumulasi yang lebih rendah atau cenderung menahan logam di akar dibandingkan *Avicennia marina* yang memiliki akar nafas dan beberapa serabut akar halus menempel pada sedimen.

Selanjutnya hasil uji konsentrasi logam berat besi (Fe) pada daun, secara keseluruhan menunjukkan nilai konsentrasi jauh lebih rendah dibandingkan akar maupun sedimen, yaitu berkisar antara terendah 1,92 mg/kg pada *Sonneratia alba* hingga tertinggi 5,64 mg/kg pada *Rhizophora mucronata*. Rendahnya kandungan logam berat besi (Fe) pada daun mangrove dikarenakan sebagian jenis mangrove cenderung menahan logam pada jaringan akar dan adanya mekanisme perlindungan organisme mangrove agar tidak terjadi penumpukan logam berat toksik secara berlebihan yang dapat mengganggu proses fisiologis tumbuhan.

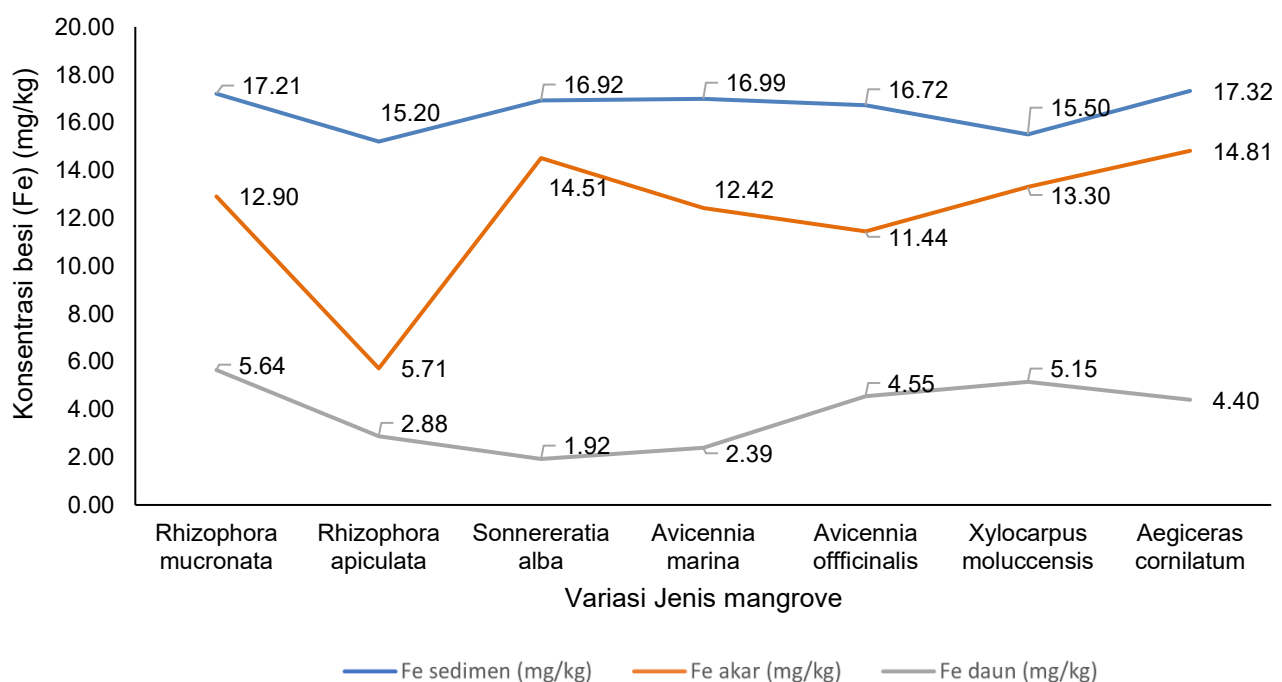
Analisis berikutnya yaitu perhitungan BCF (*Bioconcentration Factor*) pada beberapa jenis mangrove. Hasil perhitungan BCF daun dan akar sampel mangrove menunjukkan semua jenis mangrove memiliki rentang nilai BCF daun 0,11 hingga 0,33 atau <1, kemudian BCF akar memiliki rentang nilai 0,38 hingga 0,86, atau <1, seperti yang dilihat pada Tabel 1. Nilai BCF akar dihitung dari perbandingan konsentrasi logam berat Fe antara akar dan sedimen, kemudian BCF daun dari perbandingan daun dengan sedimen. Hasil perhitungan keseluruhan nilai < 1, dengan variasi nilai antara 0,11 hingga 0,40. Apabila nilai BCF < 1 maka semua jenis mangrove tersebut bukan merupakan tanaman hiperakumulator dalam mengakumulasi logam berat pada mangrove. Meskipun demikian, nilai BCF < 1 tidak menunjukkan bahwa mangrove tidak berperan dalam fitoremediasi. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme fitoremediator yang terjadi cenderung

melalui proses lain, seperti rhizofiltration, yaitu penyerapan dan pengikatan logam berat pada sistem perakaran, metalimmobilization, yaitu pengendapan atau penyerapan logam berat dalam jaringan akar untuk menurunkan tingkat toksisitas bagi tanaman. Nilai BCF akar yang lebih tinggi dibandingkan daun juga menunjukkan bahwa Fe lebih banyak tertahan pada bagian akar dan tidak banyak ditranslokasikan ke bagian atas tanaman. Dengan demikian, mangrove pada lokasi penelitian ini lebih berperan sebagai agen fitostabilisasi, yaitu menahan dan menstabilkan logam berat Fe di sedimen, sehingga tetap berkontribusi dalam proses fitoremediasi di ekosistem mangrove meskipun tidak berperan sebagai hiperakumulator.

Selain menunjukkan bahwa seluruh nilai BCF < 1 , analisis yang lebih detail memperlihatkan adanya perbedaan kemampuan akumulasi Fe antar spesies mangrove. Berdasarkan Tabel 1, nilai akar tertinggi ditemukan pada *Sonneratia alba*, *Xylocarpus moluccensis*, dan *Aegiceras corniculatum* (0,86), yang menunjukkan bahwa tiga spesies tersebut memiliki kemampuan relatif lebih tinggi dalam menyerap dan mengakumulasi Fe dari sedimen dibandingkan spesies lainnya. Sebaliknya, nilai BCF akar terendah terdapat pada *Rhizophora apiculata* (0,38), yang mengindikasikan kemampuan akumulasi yang paling rendah. Nilai tertinggi terdapat pada daun *Rhizophora mucronata*,

Tabel 1. Nilai Faktor Biokonsentrasi (BCF) terhadap akumulasi logam berat besi (Fe) pada jaringan daun dan akar beberapa jenis mangrove

Jenis Mangrove	BCF = Daun/ Sedimen	BCF = Akar/ Sedimen
<i>Rhizophora mucronata</i>	0,33	0,75
<i>Rhizophora apiculata</i>	0,19	0,38
<i>Sonneratia alba</i>	0,11	0,86
<i>Avicennia marina</i>	0,14	0,73
<i>Avicennia officinalis</i>	0,27	0,68
<i>Xylocarpus moluccensis</i>	0,33	0,86
<i>Aegiceras corniculatum</i>	0,25	0,86



Gambar 2. Konsentrasi Logam Besi (Fe) pada Beberapa Spesies Mangrove

Xylocarpus moluccensis (0,33), sedangkan nilai terendah pada *Sonneratia alba* (0,11). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun secara umum akumulasi Fe pada daun rendah, terdapat variasi kemampuan translokasi yang terdapat antar spesies. Perbedaan nilai BCF ini mengindikasikan bahwa setiap spesies mangrove memiliki strategi fisiologis yang berbeda dalam merespon keberadaan logam Fe di lingkungan. Spesies dengan nilai BCF akar lebih tinggi cenderung berperan dalam fitostabilisasi, yaitu menahan logam pada sistem perakaran, sedangkan spesies dengan nilai rendah menunjukkan mekanisme penyaringan yang lebih kuat terhadap logam berat (Dharmaningtyas *et al.*, 2025).

Selanjutnya adalah menentukan Faktor Translokasi (TF) atau perpindahan unsur logam dari akar ke daun. Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan nilai TF yang didapatkan dengan mengukur rasio konsentrasi serapan logam berat Fe dari akar ke daun pada beberapa jenis mangrove. Nilai TF yang tercatat cukup bervariasi, terendah 0,13 pada *Sonneratia alba* hingga tertinggi 0,50 *Rhizophora apiculata*. Keseluruhan nilai TF < 1 menunjukkan bahwa 7 jenis mangrove yang diteliti mentranslokasikan logam berat dari akar menuju daun dalam tingkat yang rendah atau jumlah kecil, sehingga memiliki potensi rendah dalam akumulasi logam berat.

Analisis faktor translokasi (TF) juga menunjukkan variasi antar spesies yang penting untuk diinterpretasikan. Nilai TF tertinggi ditemukan pada *Rhizophora apiculata* (0,50), diikuti oleh *Rhizophora mucronata*, (0,43) dan *Avicennia officinalis* (0,39). Hal ini menunjukkan bahwa spesies tersebut memiliki kemampuan relatif lebih tinggi dalam mentranslokasikan Fe dari akar ke daun dibandingkan spesies lainnya. Sebaliknya, nilai TF terendah terdapat pada *Sonneratia alba* (0,13) yang menunjukkan bahwa logam Fe lebih banyak tertahan di akar dan sangat terbatas ditranslokasikan ke bagian daun. Meskipun seluruh nilai TF < 1, perbedaan ini mengindikasikan adanya variasi efisiensi mekanisme internal tanaman dalam mengukur distribusi logam. Spesies dengan nilai TF lebih tinggi berpotensi memiliki resiko akumulasi logam pada jaringan fotosintetik, sedangkan spesies dengan TF rendah menunjukkan mekanisme detoksifikasi lebih kuat terhadap daun.

Nilai faktor biokonsentrasi (BCF) dan faktor translokasi (TF) keseluruhan mempunyai nilai < 1 menunjukkan bahwa seluruh spesies mangrove pada lokasi penelitian tidak semua spesies memiliki peran ekologis yang sama dalam fotoremediasi. Spesies seperti *Sonneratia alba*, *Xylocarpus moluccensis*, dan *Aegiceras corniculatum* yang memiliki faktor biokonsentrasi tinggi yang menandakan spesies tersebut kurang berpotensi dalam mengakumulasi logam berat Fe, namun TF rendah cenderung lebih efektif sebagai agen fitostabilisasi, yaitu menahan dan mengakumulasi logam pada bagian akar tanpa mentranslokasikannya ke daun. Sebaliknya, spesies seperti *Rhizophora apiculata* menunjukkan nilai TF tertinggi meskipun nilai BCF relatif rendah, yang mengindikasikan adanya kecenderungan translokasi logam ke bagian tanaman, namun dengan kapasitas akumulasi yang terbatas. Dengan demikian, meskipun seluruh spesies tergolong hiperakumulator, beberapa spesies tetap memiliki potensi relatif lebih tinggi dibandingkan yang lain dalam mekanisme fitoremediasi tertentu. Hal ini penting dalam menentukan strategi pengelolaan ekosistem mangrove, dimana spesies dengan kemampuan fitostabilisasi tinggi dapat diprioritaskan untuk menahan pencemaran logam di sedimen. Parameter lingkungan yang diukur pada perairan Martajasah, Bangkalan, menunjukkan salinitas sebesar 25 ppt, pH tanah 6,5, DO 6,3 mg/L, dan suhu 33,8 °C.

Tabel 2. Nilai Faktor Translokasi (TF) pada Beberapa Jenis Mangrove

Jenis Mangrove	TF (Daun/ Akar)
<i>Rhizophora mucronata</i>	0,43
<i>Rhizophora apiculata</i>	0,50
<i>Sonneratia alba</i>	0,13
<i>Avicennia marina</i>	0,19
<i>Avicennia officinalis</i>	0,39
<i>Xylocarpus moluccensis</i>	0,38
<i>Aegiceras corniculatum</i>	0,29

Kondisi tersebut relatif masih dalam kisaran optimum bagi pertumbuhan mangrove, namun dapat mempengaruhi ketersediaan logam Fe dalam sedimen. Menurut Tsabita *et al.* (2025), faktor-faktor yang memengaruhi kondisi ekosistem mangrove berhubungan erat dengan aspek lingkungan, termasuk kualitas perairan. Beberapa parameter seperti kadar oksigen terlarut dan nilai pH tanah berperan penting dalam mendukung keberlangsungan hidup mangrove (Tefarani *et al.*, 2019). Selain itu, suhu dan salinitas juga merupakan faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap pertumbuhan mangrove.

Nilai pH tanah sebesar 6,5 tergolong sedikit asam hingga netral, yang secara langsung mempengaruhi kelarutan Fe. Pada kondisi pH rendah (lebih asam), Fe cenderung lebih mudah larut dalam bentuk Fe^{2+} sehingga lebih tersedia di lingkungan perairan. Sebaliknya, jika pH meningkat (lebih besar), Fe mengalami presipitasi dan membentuk senyawa tidak terlarut seperti $\text{Fe}(\text{OH})_3$, sehingga ketersediaannya menurun. Dengan demikian, pH 6,5 masih memungkinkan Fe berada dalam bentuk yang relatif tersedia bagi ekosistem mangrove. Kadar oksigen (DO) sebesar 6,3 mg/L menunjukkan kondisi perairan yang cukup teroksigenasi. DO berperan dalam proses oksidasi besi, yaitu mengubah Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} (Sitorus *et al.*, 2025). Fe^{2+} bersifat lebih larut dan mudah bergerak dalam sedimen, sedangkan Fe^{3+} cenderung membentuk endapan tidak larut (Prihaningtyas *et al.*, 2025). Oleh karena itu, tingginya DO dapat menurunkan mobilitas Fe karena mendorong terbentuknya Fe^{3+} yang mengendap. Salinitas sebesar 25 ppt juga mempengaruhi ketersediaan Fe melalui proses kompleksasi ion. Dalam lingkungan dengan salinitas tinggi, ion-ion seperti klorida (Cl^-) dapat berkaitan dengan Fe membentuk kompleks terlarut. Kompleks ini dapat meningkatkan atau menurunkan ketersediaan Fe tergantung pada kondisi kimia perairan, namun umumnya dapat meningkatkan mobilitas Fe dalam sistem mangrove. Selain itu, suhu sebesar 33,8 °C dapat mempercepat reaksi kimia, termasuk reaksi penurunan konsentrasi Fe, sehingga dinamika perubahan bentuk Fe di sedimen menjadi lebih aktif. Kombinasi antara DO, pH, salinitas, suhu ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan masih mendukung pertumbuhan mangrove.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh spesies mangrove di Perairan Martajasah, Bangkalan, memiliki kemampuan akumulasi Fe yang relatif rendah (BCF dan $\text{TF} < 1$), sehingga tidak tergolong sebagai hiperakumulator. Meskipun demikian, terdapat perbedaan antara spesies mangrove, dimana beberapa spesies seperti *Sonneratia alba*, *Xylocarpus moluccensis*, dan *Aegiceras corniculatum* cenderung berperan dalam fitostabilisasi dengan menahan Fe pada akar, sementara *Rhizophora apiculata* menunjukkan kecenderungan translokasi yang lebih tinggi meskipun kapasitas akumulasinya terbatas. Secara ekologis, temuan ini mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove di lokasi penelitian lebih berfokus sebagai penyangga yang menstabilkan logam berat Fe di sedimen dari pada sebagai agen fitoremediasi aktif yang mengekstraksi logam dari lingkungan. Hal ini penting dalam mengurangi mobilitas dan bioavailabilitas logam berat, meskipun tidak melalui mekanisme hiperakumulator. Dari sisi kontribusi ilmiah, penelitian ini menambah pemahaman mengenai logam esensial seperti Fe pada sistem mangrove, khususnya melalui pendekatan perbandingan antar spesies dan integritas analisis sedimen, akar, daun menggunakan parameter BCF dan TF. Hasil ini menegaskan bahwa evaluasi potensi fitoremediasi tidak dapat hanya didasarkan pada nilai BCF dan TF, tetapi perlu mempertimbangkan faktor fisiologis tanaman, laju pertumbuhan, serta kondisi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang mengintegrasikan aspek tersebut sangat diperlukan untuk memperoleh penilaian yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih sebesar-besarnya kepada pihak Lembaga Penelitian & Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Trunodjoyo Madura, atas kontribusi pendanaan pada skema Penelitian Mandiri kontrak penelitian nomor: 175/ UN46.4.1/PT.01.03/ RISMAN/2025 tahun 2025 untuk mendukung

program Merdeka Kampus Merdeka Belajar (MBKM) khususnya MBKM bidang riset, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik

DAFTAR PUSTAKA

- Afifudin, A.F.M., Pramesti, H.N., Irawanto, R., Sari, A., Soegianto, A., Affandi, M., & Payus, C.M., 2025. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in western Madura strait sediments. *Results in Engineering*, 26:105–157.
- Afifudin, A.F.M., Wulandari, A., & Irawanto, R., 2024. Pencemaran logam berat dalam air, sedimen, dan organisme di beberapa sungai di Pulau Jawa, Indonesia: Tinjauan pustaka. *Jurnal Pencemaran Lingkungan*, 4(1):959–971.
- Baker, A.J.M., & Brooks, R.R., 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements — a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1:81–126.
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R., 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9).
- Dharmaningtyas, N., Muskananfolo, M.R., & Taufani, W.T., 2025. Kemampuan mangrove *Avicennia* sp. dan *Rhizophora* sp. dalam fitoremediasi logam berat timbal (Pb), tembaga (Cu) dan kadmium (Cd) di kawasan mangrove, Trimulyo, Genuk, Semarang. *Jurnal Pasir Laut*, 6(1):29–32.
- El-Sharkawy, M., Alotaibi, M.O., Li, J., Du, D., & Mahmoud, E., 2025. Heavy metal pollution in coastal environments: Ecological implications and management strategies: A review. *Sustainability*, 17(2):701.
- Harish, V., Aslam, S., Chouhan, S., Pratap, Y., & Lalotra, S., 2023. Iron toxicity in plants: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(8):1894–1900.
- Hur, R.R., Ruchimat, T., & Nuraini, Y., 2020. Analisis potensi dan permasalahan pengembangan wilayah pesisir di Kecamatan Arosbaya Kabupaten Bangkalan Madura Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Penyuluhan Perikanan dan Kelautan*, 14(2):137–157.
- Ilhami, S.Q., & Nurdini, J.A., 2024. Analisis faktor biokonsentrasi dan faktor translokasi logam berat Cu pada juvenil mangrove *Rhizophora* sp. *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*, 5(4):394–401.
- Indirawati, S.M., 2017. Pencemaran logam berat Pb dan Cd dan keluhan kesehatan pada masyarakat di kawasan pesisir Belawan. *Jurnal Ilmiah Penelitian Kesehatan*, 2(2):54–60.
- Kalra, Y., 1998. Handbook of reference methods for plant analysis. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- MacFarlane, G.R., Koller, C.E., & Blomberg, S.P., 2007. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*, 69(9):1454–1464. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.04.059
- Mahmudi, M., Adzim, A., Fitri, D.H., Lusiana, E.D., Buwono, N.R., Arsad, S., & Musa, M., 2021. Performance of *Avicennia alba* and *Rhizophora mucronata* as lead bioaccumulator in BJBR coast, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(2):169–177.
- Maulina, D.R.A., Pringgenies, D., & Haryanti, D., 2024. Kandungan logam berat Pb dan Cd dalam sedimen di Pantai Trimulyo dan Pantai Tirang, Semarang. *Journal of Marine Research*, 13(1):20–28.
- Mbaba, K.Y., 2024. Fitoremediasi logam berat Pb dan Cu pada mangrove *Rhizophora apiculata* dan *Sonneratia alba* di muara Sungai Badung Denpasar Bali. *Kappa Journal*, 8(2):286–292.
- Mentari, R.J., Soenardjo, N., & Yulianto, B., 2022. Potensi fitoremediasi mangrove *Rhizophora mucronata* terhadap logam berat tembaga di kawasan Mangrove Park, Pekalongan. *Journal of Marine Research*, 11(2):183–188.
- Naibaho, A.A., Harefa, M.S., Nainggolan, R.S., & Alfiaturahmah, V.L., 2023. Investigasi pemanfaatan hutan mangrove dan dampaknya terhadap daerah pesisir di Pantai Mangrove Paluh Getah, Tanjung Rejo. *J-CoSE: Journal of Community Service & Empowerment*, 1(1):22–33.
- Nurdini, J.A., Hidayati, D.R., Cahya, I., Noviani, A., & Ridyawati, I.W., 2024. Distribution of Pb and Fe heavy metal contamination in sea water and sediment in Bangkalan Madura sea waters. *E3S Web of Conferences*, 499:01025.

- Nurdini, J.A., Hidayati, D.R., Ilhami, S.Q., & Syaifullah, M., 2025. Potential absorption of the heavy metal lead (Pb) by mangroves *Rhizophora* sp. as a phytoremediator in the Madura Strait, East Java, Indonesia. *BIO Web of Conferences*, 176:02015.
- Plank, C.O., 1992. Plant analysis reference procedures for the southern region of the United States. Southern Region of the United States: University of Georgia.
- Pratama, C.G., & Isoni, D.W., 2025. Analisis kandungan logam berat kromium (Cr) pada sedimen dan akar mangrove *Avicennia marina* di wilayah ekosistem mangrove Wonorejo Surabaya. *Journal of Marine & Coastal Science*, 14(1).
- Pratama, F.A.P., Yuniarti, M.S., Zallesa, S., & Sunarto, S., 2023. Relationship between sediment type, total organic matter, and water quality on mangrove density on Tunda Island, Serang Banten. *Acta Aquatica: Aquatic Sciences Journal*, 15–23.
- Priantoro, E.A., Suryaatmana, P., Sumiarsa, D., & Sembiring, T., 2025. Fitoremediasi logam berat sistem lahan basah terapung menggunakan tanaman akar wangi (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) sebagai hiperakumulator. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 26(1):114–127.
- Prihaningtyas, I., Rizqullah, M.A., Azizah, K.N., Rahmah, A.M., Widyananda, A.A., & Rahman, N.A.R., 2025. Kinerja multiple tray aerator dalam peningkatan pH dan penurunan kadar besi (Fe) pada surface water. *Jurnal Chemurgy*, 9(2):131–139.
- Putri, R.D., Rofilah, S., Susetyo, E.K., Ma'ruf, N.A., Kevin, K., Solikah, A.M., & Azis, M.Y., 2024. Analisis kandungan logam berat Fe, Ni, Pb, dan Cr di kawasan muara, mangrove, dan green canyon Sungai Cijulang di Pangandaran. *Jurnal Kartika Kimia*, 7(1):1–10.
- Rahman, F.A., Listari, N., & Jannah, S.W., 2022. Bioakumulasi logam berat (Pb) pada vegetasi mangrove famili *Rhizophoraceae* di Teluk Lembar Kabupaten Lombok Barat. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 10(2):1273–1284.
- Samosir, A.M., Syarifah, M., & Sulistiono, S., 2023. Akumulasi logam berat tembaga dan timbal pada mangrove *Rhizophora mucronata* di Karangsong, Indramayu. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 14(1):101–112.
- Sari, N.E.P., Nurlela, N., & Wardoyo, S.E., 2019. Fitoremediasi tanah tercemar logam berat Cd dengan menggunakan tanaman hanjuang (*Cordyline fruticosa*). *Sains Natural: Journal of Biology and Chemistry*, 9(2):57–65.
- Sitorus, B.H., Andayani, R.D., & Afriany, R., 2025. Analisa pengaruh waktu aerasi terhadap penurunan kadar zat besi (Fe) dalam pengolahan air bersih. *Jurnal Multidisiplin Dehasen (MUDE)*, 4(4):973–978.
- Tefarani, R., Tri Martuti, N.K., & Ngabekti, S., 2019. Keanekaragaman spesies mangrove dan zonasi di wilayah Kelurahan Mangunharjo Kecamatan Tugu Kota Semarang. *Life Science*, 8(1):41–53.
- Tsabita, A., Sunarto, S., & Pamungkas, W., 2025. Pengaruh faktor lingkungan terhadap kondisi mangrove hasil rehabilitasi di Pulau Harapan, Kepulauan Seribu. *Jurnal Buletin Oseanografi Marina*, 14(2):190–204.
- Widyasari, N.L., 2021. Kajian tanaman hiperakumulator pada teknik remediasi lahan tercemar logam berat. *Jurnal Ecocentrism*, 1(1):17–24.
- Zayed, A., & Terry, N., 2003. Phytoremediation of trace elements by wetland plants. *International Journal of Phytoremediation*, 5(4):289–305.
- Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., Khan, K.A., & Li, S., 2022. Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University - Science*, 34(1):101653.