Volume 19, No. 1, 2026

ISSN: 1907-9931 (print), 2476-9991 (online)

Faktor Biokonsentrasi (BCF) Dan Faktor Translokasi (TF) Logam Berat Tembaga (Cu) Pada Beberapa Jenis Mangrove Dari Ekosistem Pesisir Bangkalan Madura, Jawa Timur

Bioconcentration Factor (BCF) And Translocation Factor (TF) Of The Heavy Metal Copper (Cu) In Several Mangrove Species From The Coastal Ecosystem Of Bangkalan, Madura, East Java

Jihannuma Adibiah Nurdini, Wakhidatun Nafisyah Aljamilah*, Aginda Sahara, Maulinna Kusumo Wardhani

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura
Jalan Raya Telang Kamal, Bangkalan, 69162

*Corresponding author email: wakhidanafisyah@gmail.com

Submitted: 12 December 2025 / Revised: 22 April 2026 / Accepted: 30 April 2026

http://doi.org/10.21107/jk.v19i1.32821

ABSTRAK

Tekanan antropogenik di kawasan pesisir, seperti industri, perikanan, dan transportasi laut, meningkatkan potensi cemaran logam berat, termasuk tembaga (Cu), yang bersifat toksik pada kadar tinggi. Mangrove berperan sebagai agen fitoremediasi melalui kemampuan menyerap dan mengakumulasi logam berat pada jaringan tanaman, terutama akar. Penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan kemampuan serapan beberapa jenis mangrove terhadap Cu di perairan pesisir Martajasah. Konsentrasi tembaga (Cu) dianalisis pada masing-masing sampel sedimen, akar, dan daun mangrove dari 7 spesies pohon mangrove dengan total 21 sampel. Parameter lingkungan perairan diukur secara in situ (suhu, salinitas, pH tanah, dan DO). Preparasi sampel dilakukan melalui destruksi basah menggunakan HNO_3 dan H_2O_2, kemudian konsentrasi tembaga (Cu) dianalisis menggunakan AAS. Nilai faktor biokonsentrasi (BCF) dan translokasi (TF) dihitung untuk menilai akumulasi dan kemampuan mangrove mentransport logam berat Cu dari sedimen menuju akar dan daun. Xylocarpus moluccensis menunjukkan faktor biokonsentrasi tertinggi baik pada akar maupun daun, namun dengan translokasi yang rendah, yang menunjukkan peran potensialnya sebagai bioakumulator sekaligus fitostabilisator di lingkungan pesisir yang terkontaminasi tembaga (Cu). Sebaliknya Avicennia officinalis dengan nilai faktor translokasi tertinggi namun dengan biokonsentrasi rendah mengindikasikan kemampuan penyerapan awal tembaga (Cu) yang rendah dengan mekanisme translokasi tinggi.

Kata Kunci: *Mangrove, Biokonsentrasi, Translokasi, Logam Berat,* Tembaga

ABSTRACT

Anthropogenic pressures in coastal areas, including industrial activities, fisheries, and maritime transportation, increase the risk of heavy metal contamination, particularly copper (Cu), which is toxic at elevated concentrations. Mangroves play a crucial role as phytoremediation agents due to their ability to absorb and accumulate heavy metals within plant tissues, especially in the roots. This study aimed to analyze and compare the uptake capacity of several mangrove species toward Cu in the coastal waters of Martajasah. Copper (Cu) concentrations were determined in sediment, root, and leaf samples collected from seven mangrove species, with a total of 21 samples. Environmental parameters, including temperature, salinity, soil pH, and dissolved oxygen (DO), were measured in situ. Sample preparation was conducted using wet digestion with HNO_3 and H_2O_2, followed by Cu analysis using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Bioconcentration Factor (BCF) and Translocation Factor (TF) were calculated to evaluate the accumulation capacity and the ability of mangroves to transport Cu from sediment to plant tissues. Xylocarpus moluccensis *exhibited the highest bioconcentration factors in both roots and leaves, but relatively low translocation, indicating its potential role as both a bioaccumulator and a phytostabilizer in Cu-contaminated coastal environments, whereas* Avicennia

officinalis *showed the highest translocation factor but low bioconcentration, suggesting limited initial Cu uptake with a more efficient internal translocation mechanism.*

Kata Kunci: *Mangrove, Phytoremediation, Heavy Metal,* Copper*, Bangkalan*

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove termasuk salah satu ekosistem pesisir yang memiliki fungsi ekologis penting, seperti menjadi habitat biota, menjaga kestabilan garis pantai, hingga berperan dalam mitigasi pencemaran (Salahuddin *et al*., 2024; Li *et al*., 2025; Cerry *et al*., 2025). Kawasan pesisir Madura dalam beberapa dekade terakhir mengalami tekanan yang diakibatkan oleh antropogenik, termasuk perikanan, industri, transportasi laut, serta limbah domestik. Kondisi ini meningkatkan potensi pencemaran logam berat (Makarim, 2024). Logam berat dapat mengendap di sedimen dan kembali naik ke kolom air akibat dinamika pasang surut air laut (Wahyudi *et al*., 2025).

Perkembangan penelitian selama lebih dari 25 tahun terakhir telah membuktikan sejumlah konsentrasi logam berat ditemukan pada uji sampel air laut dan sedimen di sebagian negara di dunia, salah satunya di Indonesia, utamanya di pesisir Madura (Nurdini *et al*., 2024). Logam berat yang dikaji pada penelitian ini adalah tembaga (Cu). Logam Cu merupakan unsur esensial dalam jumlah kecil, namun dalam konsentrasi tinggi bersifat toksik terhadap organisme akuatik dan dapat terakumulasi pada jaringan biota maupun sedimen (Rizvi *et al*., 2021; Jeong *et al*., 2023). Keadaan tersebut menimbulkan risiko ekologis dan kesehatan, terutama karena wilayah pesisir Madura memiliki peran strategis dalam perikanan dan mata pencaharian masyarakat pesisir (Siringoringo *et al*., 2022; Kirana *et al*., 2022).

Mangrove memiliki kemampuan alami dalam melakukan proses fitoremediasi yang mencakup penyerapan, akumulasi, dan detoksifikasi logam berat dari lingkungan perairan (Abeywardhana *et al*., 2022; Ivorra *et al*., 2021). Struktur perakaran mangrove yang kompleks dan khas berfungsi efektif dalam menjebak partikel sedimen serta memfasilitasi penyerapan logam berat dari kolom air (Rozirwan *et al*., 2025; Peny *et al*., 2025). Telah banyak penelitian, baik di Indonesia maupun di berbagai negara melaporkan bahwa spesies seperti *Avicennia marina*, *Rhizophora sp.*, dan *Sonneratia alba* memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap unsur tembaga (Cu), timbal (Pb), dan logam berat lainnya melalui sistem akar (Akhand et al., 2012 ; Nurdini *et al*., 2025 ; Valentino *et al*., 2025). Logam berat yang terserap tersebut dapat terakumulasi pada berbagai bagian tumbuhan, seperti batang dan daun, tanpa menimbulkan efek toksik yang signifikan bagi tanaman. Oleh karena itu, mangrove berperan penting sebagai biofilter alami yang dapat mengurangi dampak pencemaran logam berat di wilayah pesisir (Rahman *et al*., 2022).

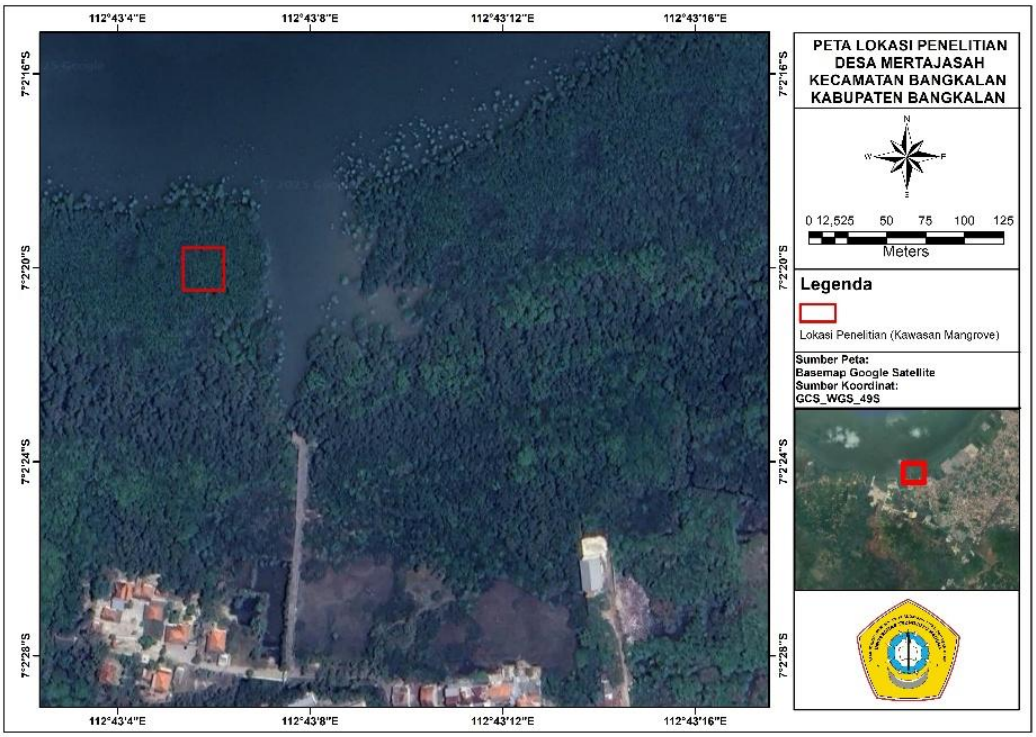
Kapasitas mangrove dalam menyerap logam berat sangat dipengaruhi oleh faktor spesies, kondisi lingkungan, serta tingkat konsentrasi logam di perairan sekitarnya (Wijaya & Sanjaya, 2021). Studi terbaru menunjukkan bahwa perbedaan spesies mangrove di pesisir Indonesia memiliki variasi dalam kemampuan menyerap logam Cu, terutama pada akar yang berperan dominan dalam akumulasi (Putri *et al*., 2023). Faktor lingkungan seperti salinitas, karakteristik sedimen, dan intensitas aktivitas antropogenik turut memberikan pengaruh signifikan terhadap tingkat penyerapan logam berat oleh vegetasi mangrove (Alfian *et al*., 2021). Variasi kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan fitoremediasi mangrove bersifat spesifik terhadap lokasi dan spesies yang mendominasi suatu kawasan. Oleh karena itu, kajian mendalam terkait identifikasi kemampuan penyerapan mangrove terhadap logam berat tembaga (Cu) di wilayah pesisir Madura penting dilakukan untuk mengetahui potensi alami ekosistem ini dalam mitigasi pencemaran. (Mentari *et al*., 2022)

Penelitian ini memiliki relevansi penting dalam mendukung upaya pengelolaan lingkungan pesisir Madura secara berkelanjutan. Melalui hasil identifikasi, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai peran ekosistem mangrove dalam menurunkan konsentrasi logam berat melalui mekanisme fitoremediasi, khususnya tembaga (Cu) di perairan. Informasi tersebut dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi konservasi dan restorasi mangrove guna menjaga keseimbangan ekosistem pesisir. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi perbedaan kemampuan beberapa jenis mangrove dalam menyerap logam berat tembaga (Cu) pada perairan Bangkalan.

MATERI DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian berikut yang meliputi survei lokasi, pengambilan sampel, preparasi sampel, analisis sampel, hingga proses pengolahan data data dilaksanakan selama kurun bulan September hingga Oktober 2025. Pengambilan sampel dilakukan di Kawasan mangrove pesisir Desa Martajasah, Kecamatan Bangkalan, Kabupaten Bangkalan, Provinsi Jawa Timur. Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan teknik *purposive sampling*, yaitu pemilihan sampel secara sengaja berdasarkan pertimbangan tertentu, seperti jenis mangrove yang dominan, kondisi lingkungan yang mewakili karakteristik lokasi penelitian, serta tingkat keterpaparan terhadap sumber potensial pencemar logam berat di kawasan pesisir Martajasah, Bangkalan. Lokasi penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1.** Selanjutnya untuk preparasi hingga analisis sampel dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Universitas Trunojoyo Madura.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk preparasi hingga analisis sampel diantaranya adalah oven, timbangan analitik, grinder, gelas beaker, kaca arloji, hotplate, labu ukur 50 ml, pipet volume, pipet pump, dan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometry*). Bahan yang digunakan adalah sampel akar, daun, dan sedimen mangrove, air deionisasi, HNO_3, H_2O_2, larutan induk Cu, kertas saring, dan aluminium foil.

Metode Penelitian

Penelitian ini menganalisis kandungan logam berat tembaga (Cu) dari 7 spesies tanaman mangrove beserta sedimen sebagai substrat hidupnya. Sampel diambil pada masing-masing jenis mangrove yang terdiri dari 7 sampel akar, 7 sampel daun, dan 7 sampel sedimen, sehingga total keseluruhan 21 sampel. Sampel akar diambil pada bagian akar tunjang utama yang terbenam pada sedimen. Sampel daun dipilih beberapa lembar daun berwarna hijau tua yang mengindikasikan usia daun lebih matang. Sampel sedimen diambil pada permukaan substrat hingga kedalaman kurang lebih 15 cm. Keseluruhan sampel berasal dari satu lokasi pengambilan sampel yaitu Perairan Martajasah Bangkalan.

Selain data utama, untuk mendukung interpretasi data, pengukuran parameter lingkungan perairan dilakukan secara in situ, mencakup suhu air laut, salinitas, pH tanah, dan kadar oksigen terlarut (DO) (Maulina *et al*., 2024). Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif melalui analisis laboratorium terhadap konsentrasi tembaga (Cu) dengan sampel akar, daun, dan sedimen mangrove. Tujuannya untuk membandingkan kemampuan beberapa

spesies mangrove dalam menyerap Cu sebagai agen fitoremediasi dan biofilter alami. Proses analisis di laboratorium dimulai dengan pengeringan sampel dalam oven bersuhu 80^{O}C selama 24 - 48 jam hingga kadar air minimal. Setelah kering, sampel dihaluskan dengan grinder hingga berbentuk serbuk kemudian ditimbang masing-masing sebanyak ± 1 gram untuk tahap destruksi sampel.

Proses destruksi menggunakan metode *wet digestion* yang dikembangkan oleh Plank (1992) dan Kalra (1998) dengan sedikit modifikasi. Sebanyak 1 gram sampel dimasukkan ke dalam gelas beaker 50 mL, kemudian ditambahkan 5 mL larutan HNO_3. Campuran tersebut dipanaskan pada suhu 125^{o}C hingga bahan organik terurai dengan menjaga agar larutan tidak dalam kondisi mendidih berlebihan. Setelah dingin, proses pemanasan dilakukan ulang dengan penambahan H_2O_2 30% secara perlahan hingga larutan jernih. Pemanasan dilanjutkan pada suhu 80^{o}C hingga sampel hampir kering. Residu yang diperoleh kemudian dilarutkan kembali menggunakan 2 ml HNO_3 dan 10 ml air deionisasi, dilanjutkan penyaringan menggunakan kertas saring. Pada tahap akhir preparasi sampel, dilakukan pengenceran hasil destruksi sampel hingga volume 50 ml atau batas tera labu ukur 50 ml. Jika semua tahap preparasi dengan metode destruksi basah selesai dilakukan, sampel selanjutnya diuji konsentrasi logam berat tembaga (Cu) menggunakan instrumen *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dengan hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan mg/L atau ppm.

Dalam kajian tanaman hiperakumulator, parameter utama yang dievaluasi adalah konsentrasi logam pada sedimen, akar, dan daun. Tanaman hiperakumulator dikenal mampu mengakumulasi dan menahan logam berat termasuk Cu dalam jaringan akar, daun atau sedimen di sekitarnya (Priantoro *et al*., 2025). Adapun dalam menilai akumulasi logam, digunakan perhitungan faktor biokonsentrasi (BCF) dan faktor translokasi (TF) (Samosir *et al*., 2023). Rumus BCF dan TF yang umum diaplikasikan dalam studi fitoremediasi merujuk pada persamaan yang diperkenalkan oleh Baker dan Brooks (1989), Electric Power Research Institute (EPRI) (2001), serta MacFarlane *et al*., (2007). BCF berfungsi untuk mengukur kemampuan suatu organisme, termasuk tanaman, dalam mengakumulasi logam berat dari sedimen atau substrat dengan perhitungan menggunakan persamaan **(1)**. Nilai BCF > 1 mengindikasikan potensi organisme organisme tersebut sebagai hiperakumulator yang mampu menyerap logam Cu dari lingkungannya (Ilhami & Nurdini, 2024). Sementara TF dihitung dari rasio konsentrasi logam pada daun dibandingkan dengan akar seperti pada persamaan **(2)**, dan nilai TF > 1 menandakan bahwa tanaman dapat mentranslokasikan Cu secara efektif dari akar ke bagian atas tanaman. Analisis parameter ini krusial dalam kajian fitoremediasi, yaitu pemanfaatan tanaman sebagai agen pemulihan lahan tercemar logam berat dengan pendekatan yang lebih ramah lingkungan (Mentari *et al*., 2022; Sari *et al*., 2019; dan Mbaba, 2024).

$$BCF = \frac{C_{akar\ /\ daun}}{C_{Sedimen}} \quad \text{..... (1)}$$

$$TF = \frac{BCF_{Daun}}{BCF_{Akar}} \quad \text{..... (2)}$$

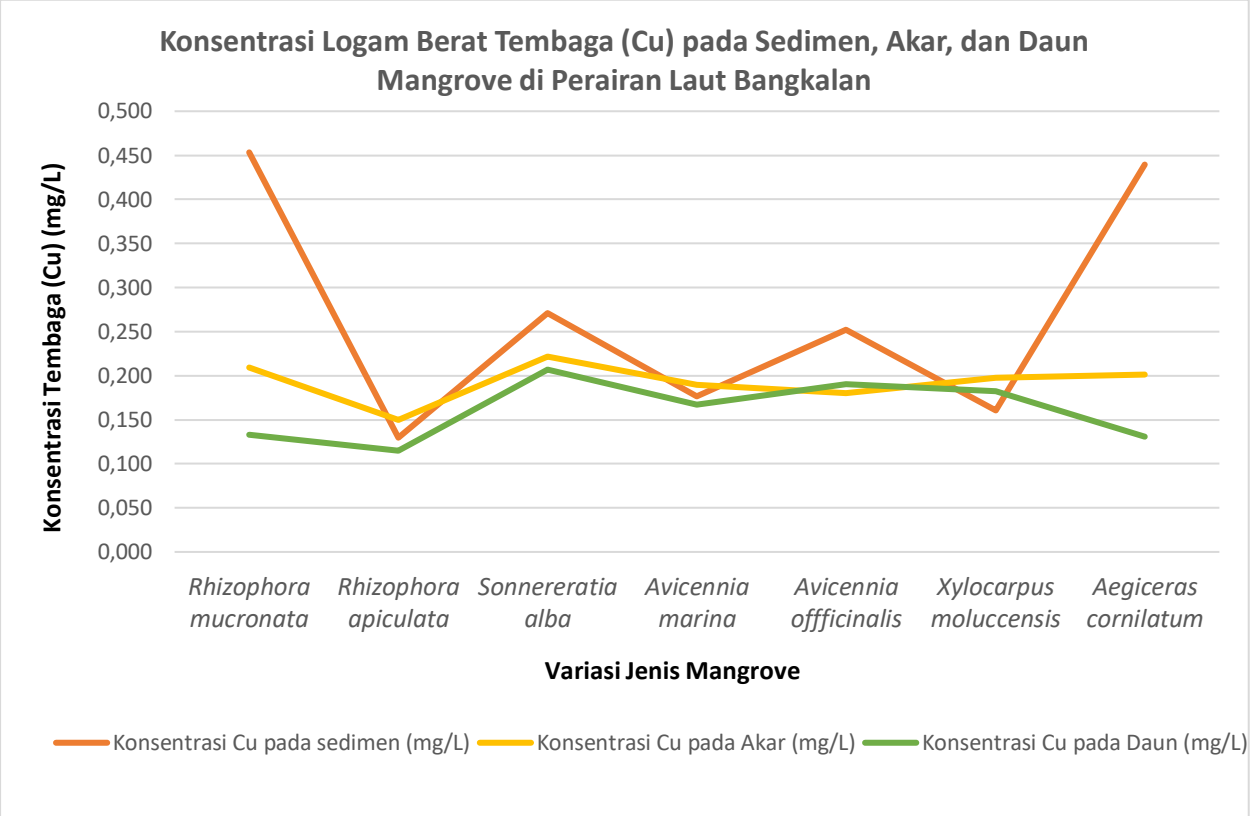
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan Logam Berat Tembaga (Cu) Pada Sedimen, Akar, dan Daun Mangrove

Berdasarkan hasil analisis konsentrasi logam berat tembaga (Cu) pada tujuh jenis spesies mangrove terdapat variasi nilai konsentrasi Cu pada sampel sedimen, akar, dan daun mangrove yang menunjukkan perbedaan kemampuan akumulasi antarspesies. Hasil tersebut didapatkan dari pengujian dengan menggunakan instrument *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) di Laboratorium Terpadu Universitas Trunojoyo Madura, selengkapnya diilustrasikan dengan grafik **Gambar 2**.

Grafik **Gambar 2** menunjukkan konsentrasi tembaga (Cu) pada sedimen berada pada rentang nilai antara 0,1296 mg/L hingga 0,4533 mg/L, yang mengindikasikan bahwa sedimen merupakan reservoir utama akumulasi logam berat. Hal ini terjadi karena massa jenis logam berat yang lebih besar dibandingkan air laut menyebabkan logam cenderung mengendap dan terakumulasi di lapisan sedimen seiring waktu berjalan. Konsentrasi tembaga (Cu) tertinggi pada sedimen ditemukan pada spesies *Rhizophora mucronata* sebesar 0,4533 mg/L, sedangkan konsentrasi terendah terdapat pada *Rhizophora apiculata* sebesar 0,1296 mg/L. Variasi konsentrasi logam pada sedimen antarjenis mangrove dipengaruhi oleh perbedaan tipe akar dan zona perakaran masing-masing spesies. Struktur akar dan karakteristik zona perakaran memiliki keterkaitan erat dengan kondisi aerasi sedimen, aktivitas mikroba, potensi redoks,

serta distribusi bahan organik. Potensi redoks yang dimaksud adalah indikator apakah sedimen memiliki banyak oksigen (oksidatif) atau sedikit oksigen (reduktif) (Pezeshki and DeLaune, 2012). Sebagai contoh, Rhizophora sp. dengan akar tunjang memiliki kontak yang terbatas dengan sedimen, sehingga aerasi di sekitar akar menjadi rendah dan menyebabkan logam berat banyak berada dalam bentuk sulfida yang memiliki mobilitas rendah (Tam & Wang, 1996; Alongi, 2002).



Gambar 2. Konsentrasi Logam Tembaga (Cu) pada Beberapa Spesies Mangrove

Konsentrasi tembaga (Cu) pada jaringan akar menunjukkan variasi antarspesies mangrove, dengan nilai terendah teridentifikasi pada *Rhizophora apiculata* sebesar 0,1498 mg/L, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada *Sonneratia alba* sebesar 0,2215 mg/L. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa setiap jenis mangrove memiliki kapasitas yang berbeda dalam menyerap dan mengakumulasi Cu dari sedimen menuju jaringan akar. Variasi kemampuan penyerapan tersebut dipengaruhi oleh kombinasi faktor fisiologis, struktur morfologi akar, serta kondisi mikrohabitat di zona perakaran. Beberapa penelitian, seperti yang dilaporkan oleh Mahmudi *et al*., (2021) dan MacFarlane *et al*., (2007), menunjukkan bahwa *Rhizophora sp*. dengan tipe akar tunjang cenderung memiliki efisiensi akumulasi logam yang lebih rendah, atau menahan logam pada akar dengan mobilitas terbatas. Sebaliknya, spesies *Sonneratia alba* yang memiliki sistem perakaran lebih menyebar dan kontak lebih luas dengan sedimen sering menunjukkan kemampuan serapan logam yang lebih besar. Hal ini sejalan dengan tingginya nilai Cu pada akar *S.alba* dalam penelitian ini, yang mengindikasikan kapasitas akumulasi yang lebih efektif dibanding dua spesies *Rhizophora* lainnya. Konsentrasi logam berat pada tubuh mangrove umumnya paling tinggi ditemukan pada bagian akar karena struktur ini berinteraksi langsung dengan sedimen yang menjadi tempat akumulasi endapan logam.

Hasil analisis konsentrasi logam berat tembaga (Cu) pada daun menunjukkan bahwa akumulasi Cu pada bagian ini jauh lebih rendah dibandingkan pada akar maupun sedimen. Nilai konsentrasi Cu daun berada dalam rentang 0,1148 mg/L pada *Rhizophora apiculata* sebagai nilai terendah hingga 0,2069 mg/L pada *Sonneratia alba* sebagai nilai tertinggi. Rendahnya konsentrasi Cu pada daun mengindikasikan bahwa sebagian besar spesies mangrove cenderung menahan dan mengakumulasi logam berat pada jaringan akar, sehingga hanya sebagian kecil yang ditranslokasikan ke organ tanaman bagian atas. Mekanisme ini merupakan bentuk perlindungan fisiologis utuk mencegah

penumpukan Cu pada daun yang berpotensi mengganggu proses metabolik, terutama fotosintesis. MacFarlane & Burchett (2022) melaporkan bahwa akumulasi logam berat pada daun dapat merusak ultrastruktur kloropas dan menurunkan efisiensi fotosintesis.

Faktor Biokonsentrasi

Analisis berikutnya berfokus pada perhitungan *Bioconcentration Factor* (BCF) untuk tujuh spesies mangrove yang diuji. Berdasarkan hasil perhitungan faktor biokonsentrasi tembaga (Cu) pada tujuh spesies mangrove, terlihat adanya variasi kemampuan akumulasi Cu antara jaringan daun dan akar. Secara umum, nilai BCF daun terhadap sedimen menunjukkan rentang 0,29 hingga 1,14, sedangkan BCF akar terhadap sedimen berada pada kisaran 0,46 hingga 1,23. Variasi nilai ini mengindikasikan perbedaan strategi fisiologis masing-masing spesies dalam menyerap Cu dari sedimen. Nilai BCF daun < 1 yang ditemukan pada *Rhizophora mucronata*, *Sonneratia alba*, *Avicennia officinalis*, dan *Aegiceras corniculatum* menunjukkan bahwa spesies-spesies tersebut memiliki kemampuan akumulasi Cu yang relatif rendah pada bagian daun. Hal ini menunjukkan adanya mekanisme ekslusi atau pembuatan translokasi Cu dari akar menuju jaringan fotosintetik sebagai bentuk toleransi terhadap logam berat. Sebaliknya, nilai daun mendekati atau sedikit melebihi 1 pada *Avicennia marina* (0,95) dan *Xylocarpus moluccensis* (1,14) mengindikasikan potensi akumulasi yang lebih tinggi, sehingga kedua spesies tersebut memperlihatkan kecenderungan transportasi Cu ke jaringan daun secara lebih efektif dibandingkan spesies lainnya.

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

No.	Jenis Mangrove	Konsentrasi Cu di Akar (mg/L)	Konsentrasi Cu Sedimen (mg/L)	BCF = Daun / Sedimen (mg/L)	BCF = Akar / Sedimen (mg/L)
1	*Rhizophora mucronata*	0,2089	0,4533	0,29	0,46
2	*Rhizophora apiculata*	0,1498	0,1296	0,89	1,16
3	*Sonneratia alba*	0,2216	0,2707	0,76	0,82
4	*Avicennia marina*	0,1894	0,1766	0,95	1,07
5	*Avicennia officinalis*	0,1800	0,2518	0,75	0,71
6	*Xylocarpus moluccensis*	0,1974	0,1605	1,14	1,23
7	*Aegiceras corniculatum*	0,2015	0,4392	0,30	0,46

Sementara itu, analisis BCF akar terhadap sedimen menunjukkan bahwa tiga spesies mangrove memiliki nilai ≥ 1, yakni *Rhizophora apiculata* (1,16), *Avicennia marina* (1,07), dan *Xylocarpus moluccensis* (1,23). Nilai BCF akar terhadap sedimen yang tinggi tersebut menandakan adanya akumulasi Cu yang kuat dalam sistem perakaran. Di sisi lain, nilai BCF akar terhadap sedimen < 1 pada *Rhizophora mucronata*, *Sonneratia alba*, *Avicennia officinalis*, dan *Aegiceras corniculatum* menunjukkan bahwa spesies tersebut lebih bersifat toleran dan mempertahankan strategi penghindaran akumulasi Cu pada jaringan tanaman yang terbenam sedimen. Pola nilai BCF secara keseluruhan memperlihatkan bahwa *Xylocarpus moluccensis* dan *Rhizophora apiculata* memiliki potensi paling tinggi sebagai akumulator Cu, khususnya pada bagian akar. Adanya temuan nilai faktor biokonsentrasi (BCF) Cu pada akar yang lebih tinggi dibandingkan daun memperkuat pernyataan bahwa akar memiliki kapasitas akumulasi Cu yang lebih besar. Hasil ini sejalan dengan temuan Samosir *et al*., (2023) yang menyatakan bahwa BCF pada akar mangrove cenderung lebih tinggi daripada pada daun. Besarnya nilai BCF menunjukkan kemampuan tanaman dalam mengakumulasi logam berat.

Hal ini menjadi dasar penting dalam menentukan spesies yang potensial untuk perencanaan fitoremediasi berbasis tanaman mangrove. Sementara spesies lain dengan nilai BCF < 1 lebih mengarah pada peran sebagai fitostabilisator yang mampu menahan mobilitas logam Cu tanpa mengakumulasikannya secara signifikan. Temuan ini memberikan informasi dasar dan penting mengenai kapasitas biokonsentrasi masing-masing spesies mangrove, sekaligus menjadi dasar ilmiah dalam pengelolaan ekosistem pesisir yang terkontaminasi tembaga (Cu), terutama dalam konteks bioremediasi menggunakan variasi jenis tanaman mangrove.

Faktor Translokasi

Analisa selanjutnya yaitu menentukan Faktor Translokasi (TF), berdasarkan hasil perhitungan nilai *Translocation Factor* (TF)

pada **Tabel 2.** bahwa setiap spesies mangrove menunjukkan kemampuan yang berbeda dalam mentranslokasikan Cu dari akar menuju daun. Nilai TF pada tujuh spesies mangrove tersebut berada pada rentang 0,64 hingga 1,06 yang menggambarkan variasi mekanisme internal tanaman dalam mengatur distribusi logam berat di antara jaringan vegetatifnya. Spesies dengan nilai TF < 1 yaitu *Rhizophora mucronata* (0,64), *Rhizophora apiculata* (0,77), *Sonneratia alba* (0,93), *Avicennia marina* (0,88), *Xylocarpus moluccensis* (0,93), dan *Aegiceras colniculatum* (0,65) menunjukkan bahwa akumulasi Cu lebih dominan terjadi pada akar daripada daun. Pola ini mencerminkan strategi fisiologis tanaman dalam menahan logam berat di bagian akar sebagai bentuk mekanisme perlindungan untuk mencegah kerusakan pada jaringan fotosintetik terutama daun. Secara ekologis, hal ini menandakan bahwa spesies-spesies tersebut lebih berperan sebagai *phytostabilizer* daripada *phytoextractor*, karena kemampuan translokasinya berada dalam kategori rendah. Di sisi lain, *Avicennia officinalis* merupakan satu-satunya spesies dengan nilai TF ≥ 1 menunjukkan bahwa Cu yang diserap oleh akar dapat dipindahkan ke daun dalam jumlah yang relatif lebih besar, sehingga spesies ini berpotensi sebagai kandidat fitoremediator yang lebih efektif dalam mekanisme ekstraksi logam berat. Kemampuan translokasi yang tinggi juga mencerminkan efisiensi sistem vaskular dalam memindahkan Cu melalui jaringan xilem menuju bagian atas tanaman.

Tabel 2. Nilai Faktor Translokasi (TF) Akar dan Daun pada Berbagai Jenis Mangrove

No.	Jenis Mangrove	Konsentrasi Cu di Daun (mg/L)	Konsentrasi Cu di Akar (mg/L)	TF = Daun / Akar
1.	*Rhizophora mucronata*	0,1330	0,2089	0,64
2.	*Rhizophora apiculata*	0,1148	0,1498	0,77
3.	*Sonneratia alba*	0,2069	0,2216	0,93
4.	*Avicennia marina*	0,1672	0,1894	0,88
5.	*Avicennia officinalis*	0,1901	0,1800	1,06
6.	*Xylocarpus moluccensis*	0,1827	0,1974	0,93
7.	*Aegiceras corniculatum*	0,1310	0,2015	0,65

Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar spesies mangrove cenderung memiliki pola pertahanan atau retensi Cu di akar, sedangkan hanya *Avicennia officinalis* yang memperlihatkan mekanisme translokasi yang kuat. Informasi ini sangat relevan untuk penentuan strategi fitoremediasi pada ekosistem mangrove, terutama dalam membedakan spesies yang sesuai untuk pendekatan *phytostabilization* atau *phytoextraction* dalam pengelolaan pencemaran Cu di wilayah pesisir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akar merupakan bagian tanaman mangrove yang paling banyak mengakumulasi logam berat disebabkan posisi akar yang berinteraksi langsung dengan substrat sedimen, dimana sedimen merupakan akumulator logam berat terbesar.

Kondisi Lingkungan Perairan

Berdasarkan data parameter lingkungan, kondisi perairan pada lokasi penelitian menunjukkan salinitas sebesar 25 ppt, pH tanah 6,5, kadar oksigen terlarut (DO) sebesar 6,3 mg/L, dan suhu air mencapai 33,8ºC. Kondisi ini masih berada dalam kisaran yang dapat mendukung kehidupan organisme mangrove, namun jika dibandingkan dengan baku mutu kualitas air laut berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 (**Tabel 4**), terdapat beberapa parameter yang berada di luar kisaran optimal. Berikut adalah **Tabel 3** rincian data kondisi lingkungan perairan.

Tabel 3. Parameter Lingkungan

Salinitas (ppt)	pH Tanah	Dissolved Oxygen (mg/L)	Suhu Air (ºC)
25	6,5	6,3	33,8

Tabel 4. Standar Baku Mutu Menurut PP Nomor 22 Tahun 2021

Salinitas (ppt)	pH Tanah	Dissolved Oxygen (mg/L)	Suhu Air (ºC)
34	7 - 8,5	>5	28-32

Nilai salinitas 25 ppt tergolong lebih rendah dibandingkan baku mutu sebesar 34 ppt. Pada tingkat salinitas tersebut, ion Cu cenderung berasosiasi dengan partikel sedimen sehingga konsentrasinya dalam fase terlarut relatif rendah. Akibatnya akumulasi Cu lebih dominan

terjadi pada bagian akar dibandingkan daun, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai BCF yang lebih tinggi pada akar. Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi salinitas menengah, akar mangrove berfungsi sebagai zona pertama yang berinteraksi dengan sedimen yang kaya akan ion logam Cu.

Nilai pH tanah 6,5 berada sedikit di bawah kisaran baku mutu yaitu 7 – 8,5 yang menunjukkan kondisi cenderung asam dan secara kimiawi mendukung peningkatan mobilitas Cu dalam sedimen. Pada pH mendekati netral, Cu lebih mudah berada dalam bentuk ion terlarut, sehingga meningkatkan peluang penyerapan logam oleh sistem perakaran. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa beberapa spesies mangrove, khususnya *Rhizopora apiculata*, *Avicennia marina*, dan *Xylocarpus molucensis* memiliki nilai BCF akar yang cukup tinggi (≥ 1), menandakan kemampuan akumulasi Cu yang baik pada kondisi pH tersebut.

Kadar oksigen terlarut (DO) sebesar 6,3 mg/L telah memenuhi baku mutu (>5 mg/L) yang mengindikasikan kondisi perairan yang cukup mendukung aktivitas biologis. Ketersediaan oksigen berpengaruh terhadap proses oksidasi-reduksi pada sedimen, yang selanjutnya mempengaruhi bentuk spesiasi Cu. Pada kondisi ini, sebagian Cu berada dalam bentuk yang dapat diserap akar, sehingga memperkuat pola akumulasi Cu di akar yang terlihat pada hasil penelitian.

Suhu air laut 33,8^{o}C sedikit melebihi kisaran baku mutu yaitu 28-32^{o}C mengindikasikan lingkungan tropis yang khas bagi ekosistem mangrove. Suhu tersebut dapat meningkatkan laju metabolisme dan aktivitas fisiologis tanaman, termasuk proses penyerapan dan translokasi logam. Tingginya suhu juga dapat memperkuat retensi logam pada akar karena tanaman cenderung mengatur mekanisme perlindungan untuk mencegah stres pada jaringan daun. Kondisi ini konsisten dengan nilai TF < 1 pada sebagian besar spesies, yang menunjukkan bahwa translokasi Cu dari akar ke daun berlangsung dalam intensitas rendah.

Secara keseluruhan, perbandingan antara kondisi lingkungan aktual dengan standar baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 menunjukkan bahwa beberapa parameter seperti pH dan suhu berada di luar kisaran optimal yang berpotensi meningkatkan mobilitas dan bioavaibilitas logam Cu di lingkungan. kombinasi parameter lingkungan tersebut mendukung interpretasi bahwa akumulasi Cu lebih dominan terjadi pada bagian akar dibandingkan daun, serta mempengaruhi perbedaan nilai BCF dan TF antar spesies. Kondisi fisika-kimia perairan yang ditemukan pada penelitian ini memberikan pemahaman yang penting dalam menilai potensi mangrove sebagai agen fitoremediasi logam Cu pada kawasan pesisir laut.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kandungan logam berat tembaga (Cu) tertinggi terdapat pada sedimen *Rhizopora mucronata* sebesar 0,4533 mg/L, akar *Sonneratia alba* sebesar 0,2215 mg/L, daun *Sonneratia alba* dengan nilai 0,2069 mg/L. Besaran nilai Faktor Biokonsentrasi (BCF) mangrove tertinggi secara umum terdapat pada bagian akar, dengan rata-rata nilai 0,844 atau < 1. Hal tersebut disebabkan kondisi akar yang berinteraksi langsung dengan sedimen tercemar logam berat Cu dengan konsentrasi tinggi. Nilai rata-rata Faktor Translokasi (TF) diperoleh pada nilai 0,837 atau < 1 yang mengindikasikan bahwa logam berat ditransport secara rendah dari akar ke daun mangrove. Temuan penilitian ini penting sebagai dasar pemantauan kualitas lingkungan serta penyusunan strategi pencegahan pencemaran logam berat Cu dan rehabilitasi ekosistem mangrove di wilayah pesisir. Penelitian selanjutnya disarankan menambah variasi lokasi dan spesies mangrove untuk memperkuat pemahaman kapasitas fitoremediasi Cu di kawasan pesisir laut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak Lembaga Penelitian & Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Trunojoyo Madura, atas kontribusi pendanaan pada skema Penelitian Mandiri untuk program Merdeka Kampus Merdeka Belajar (MBKM) sehingga penelitian dapat berjalan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Abeywardhana, D.C., Adikaram, N.M. and Kularatne, R.K.A. (2022). Are mangrove forests reliable sinks of heavy metals due to phytoremediation and other mechanisms? A Sri Lankan perspective. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113453. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113453.

Akhand, A., Chanda, A., Dutta, S., Hazra, S. and Sanyal, P. (2012b). Comparative study of heavy metals in selected mangroves of Sundarban ecosystem, India. *PubMed*, 33(6), pp.1045–9.

Alfian, N., Setiawan, H., & Pratama, R. (2021). Heavy metal accumulation in mangrove ecosystem and its potential for phytoremediation in tropical coastal areas. *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112235. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112235.

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.

Cerri, F., Mohamed, S. & Galli, P. (2025). Mangrove forests as a natural trap for marine plastic litter: Insights from the Maldives. *Marine Pollution Bulletin*, 213, 117677. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117677.

Ilhami, SQ, & Nurdini, JA (2024). Analisis Faktor Biokonsentrasi dan Faktor Translokasi Logam Berat Cu pada Mangrove Rhizopora sp.. Juvenil: Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan, 5 (4), 394-401. DOI: https://doi.org/10.21107/juvenil.v5i4.28067

Ivorra, L., Cardoso, P.G., Chan, S.K., Cruzeiro, C. and Tagulao, K.A. (2021). Can mangroves work as an effective phytoremediation tool for pesticide contamination? An interlinked analysis between surface water, sediments and biota. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126334. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126334.

Jeong, H., Byeon, E., Kim, D.-H., Maszczyk, P. & Lee, J.-S. (2023). Heavy metals and metalloid in aquatic invertebrates: A review of single/mixed forms, combination with other pollutants, and environmental factors. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114959. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114959.

Kalra, Y. (1998). *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Boca Raton, Florida: CRC Press: Taylor & Francis Group.

Kirana, G.C., Khairuddin, K. & Yamin, M. (2022). Analyss of Heavy Metal Content of Copper (Cu) in Cork Fish From Rawa Taliwang Lake, West Sumbawa Regency 2021. *Jurnal Biologi Tropis*, 22(3), 1033-1039. DOI: https://doi.org/10.29303/jbt.v22i3.3957.

Li, M., Ishfaq, M., González Quintero, V.A., Peng, D., Lang, T., Gao, C., Tam, N.F. & Zhou, H. (2025). Impact of elevated environmental pollutants on carbon storage in mangrove wetlands: A comprehensive review. Ecological Indicators, 178, 113830. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113830.

MacFarlane, G.R., Koller, C.E. and Blomberg, S.P. (2007). Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*, 69(9), pp.1454–1464. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.04.059.

Mahmudi, M., Adzim, A., Fitri, D.H., Lusiana, E.D., Buwono, N.R., Arsad, S. and Musa, M. (2021). Performance of Avicennia Alba and Rhizophora Mucronata as Lead Bioaccumulator in Bjbr Coast, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 22(2), pp.169–177. doi: https://doi.org/10.12911/22998993/131032.

Makarim, M.N. (2024). Prevention of decreasing river water quality due to anthropogenic activities: A systematic review of water pollution on Cisadane River. *Journal of Marine Problems and Threats*, 1(1). DOI: https://doi.org/10.61511/jmarpt.v1i1.2024.650.

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. DOI: 10.14710/jmr.v13i1.35038

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. DOI: https://doi.org/10.29408/kpj.v8i2.26421

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. DOI: https://doi.org/10.14710/jmr.v11i2.33246.

Nurdini, J.A., Hidayati, D.R., Cahya, I., Noviani, A. and 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*, [online] 499 (01025). doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449901025.

Nurdini, J.A., Hidayati, D.R., Ilhami, S.Q. and 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*, [online] 176(02015). DOI: https://doi.org/10.1051/bioconf/202517602015.

Peny, M.N., Beatrix Maureen Rehatta, Yohanes Merryanto, Tisera, W.L. and Fransisca, R. (2025). Pengaruh Kerapatan Mangrove Terhadap Laju Transpor Sedimen di Kawasan Ekowisata Mangrove Oesapa Barat, Kota Kupang. *Journal of Marine Research*, 14(1), 105-116. DOI: https://doi.org/10.14710/jmr.v14i1.46781.

Pezeshki, S.R. and DeLaune, R.D. (2012). Soil Oxidation-Reduction in Wetlands and Its Impact on Plant Functioning. *Biology*, 1(2), pp.196–221. DOI: https://doi.org/10.3390/biology1020196.

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.

Putri, A. D., Yuliana, E., & Prasetyo, D. (2023). Comparative study of copper (Cu) accumulation in different mangrove species in Jakarta Bay, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1170, 012045. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1170/1/012045.

Rahman, M. A., Karim, M. R., & Hasan, M. (2022). Phytoremediation capacity of mangrove plants in removing heavy metals from coastal environment: A case study from Southeast Asia. *Environmental Advances*, 8, 100213. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100213.

Rizvi, N. B., Singh, S., & Choudhury, R. (2021). Ecotoxicological impact of copper pollution in aquatic ecosystems: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, 100450. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100450.

Rozirwan, N., Khotimah, N, N., Wike., Fauziyah, N., Aryawati, R., Diansyah, G & Nugroho, R, Y. (2025). Biomarkers of heavy metals pollution in mangrove ecosystems: comparative assessment in industrial impact and conservation zones. *Toxicology Reports*, 102011-102011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.102011.

Salahuddin, M.A., Santoso, N. and Hermawan, R. (2024). Analysis of Mangrove Forest Management in Teluk Lembar, West Lombok, Indonesia. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(10), 7712–7725. DOI: https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i10.9485.

Samosir, A. M., Syarifah, M., & Sulistiono, S. (2023). Akumulasi Logam Berat Tembaga dan Timbal pada Mangrove Rhizopora mucronata di Karangsong, Indramayu. Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan, 14(1), 101-112. DOI: https://doi.org/10.24319/jtpk.14.101-112

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. DOI: https://doi.org/10.31938/jsn.v9i2.230

Siringoringo, V.T., Pringgenies, D. & Ambariyanto, A. (2022). Kajian Kandungan Logam Berat Merkuri (Hg), Tembaga (Cu), dan Timbal (Pb) pada Perna viridis di Kota Semarang. *Journal of Marine Research*, 11(3), 539-546. DOI: https://doi.org/10.14710/jmr.v11i3.33864.

Tam, N.F.Y. and Wong, Y.S. (1996). Retention and distribution of heavy metals in mangrove soils receiving wastewater. *Environmental Pollution*, 94(3), pp.283–291. DOI: https://doi.org/10.1016/s0269-7491(96)00115-7.

Valentino, N., Andrie Ridzky Prasetyo and Hadi, M.A. (2025). Accumulation of Heavy Metal Cd and Fe in Rhizophora

apiculata Stand Around Lembar Port West Lombok Regency. *JURNAL BIOLOGI TROPIS*, 25(1), 1148-1160. DOI: https://doi.org/10.29303/jbt.v25i1.9118.

Wahyudi, Rozirwan and Putri, W.A.E. (2025). Heavy Metal Pb, Cu, and Cd Pollution in Water and Sediment Due to Anthropogenic Activities Along the Musi River, South Sumatra. *Jurnal Penelitian Sains*, 27(1), pp.1–1. DOI: https://doi.org/10.56064/jps.v27i1.1168.

Wijaya, N, I & Sanjaya, R, F (2021). Kerapatan Mangrove terhadap Kandungan Logam Pb, Cu, dan Cd pada Daging Ikan Bandeng (Chanos chanos) di Mangrove Wonorejo, Surabaya. *JPT : Jurnal Pertanian Terpadu*, 9(2), 150-161. DOI: https://doi.org/10.36084/jpt..v9i2.334.

Electric Power Research Institute (EPRI). (2001). *Phytoremediation of trace elements by wetland plants* (Report No. 1005185). Palo Alto, CA: EPRI.