

Analisis Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada Mangrove *Rhizophora Apiculata* dan Sedimen di Kelurahan Meras Kecamatan Bunaken Kota Manado

Wawan Nurmawan^{1*}, Tommy B. Ogie², Fabiola B. Saroinsong¹

1) Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi, Manado 96115

2) Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi, Manado 96115

*Email: wawan2828@unsrat.ac.id

ABSTRAK

Ekosistem mangrove memiliki kemampuan ekologis dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat dari lingkungan pesisir, sehingga berperan penting sebagai bioindikator pencemaran. Kawasan mangrove di Kelurahan Meras, Kecamatan Bunaken, Kota Manado merupakan wilayah pesisir yang berpotensi terpapar aktivitas antropogenik seperti permukiman, pariwisata, dan aktivitas perairan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kandungan logam berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada mangrove jenis *Rhizophora apiculata* dan sedimen di sekitarnya. Pengambilan sampel dilakukan pada bagian akar, kulit batang, daun, dan sedimen dari tiga individu mangrove yang dipilih secara purposif. Analisis kandungan logam berat menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan Pb pada seluruh sampel berada di bawah batas deteksi alat ($<0,15$ mg/kg), sedangkan kandungan Cd berada di bawah $<0,02$ mg/kg. Nilai tersebut berada di bawah ambang batas baku mutu lingkungan yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 dan standar internasional (ANZECC, 2000). Rendahnya konsentrasi Pb dan Cd menunjukkan bahwa ekosistem mangrove di Kelurahan Meras masih relatif baik dan belum mengalami pencemaran logam berat secara signifikan. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa *Rhizophora apiculata* berpotensi sebagai bioindikator kualitas lingkungan pesisir serta berkontribusi dalam mitigasi pencemaran logam berat di ekosistem mangrove pesisir Manado.

Kata kunci: bioindikator; bioakumulasi; kadmium; logam berat; mangrove; *Rhizophora apiculata*; timbal.

ABSTRACT

Mangrove ecosystems possess ecological capabilities to absorb and accumulate heavy metals from coastal environments, making them important bioindicators of pollution. The mangrove area in Meras Village, Bunaken District, Manado City is a coastal area potentially exposed to anthropogenic activities such as settlements, tourism, and coastal activities. This study aimed to analyze the concentration of Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in *Rhizophora apiculata* mangroves and surrounding sediments. Samples were collected from roots, bark, leaves, and sediments of three purposively selected mangrove individuals. Heavy metal analysis was conducted using the Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) method. The results showed that Pb concentrations in all samples were below the detection limit (<0.15 mg/kg), while Cd concentrations were below <0.02 mg/kg. These values were below environmental quality standards established by Government Regulation No. 22 of 2021 and international standards (ANZECC, 2000). The low concentrations of Pb and Cd indicate that the mangrove ecosystem in Meras Village remains in relatively good condition and has not experienced significant heavy metal contamination. The findings suggest that *Rhizophora apiculata* has potential as a bioindicator of coastal environmental quality and contributes to heavy metal pollution mitigation in the Manado coastal mangrove ecosystem.

Keywords: bioindicator; bioaccumulation; cadmium; heavy metals; mangrove; *Rhizophora apiculata*; lead.

1. PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki fungsi ekologis penting, seperti melindungi garis pantai dari abrasi, menjadi habitat berbagai biota perairan, penyerap karbon, serta menjaga kualitas lingkungan pesisir. Selain itu, mangrove juga berperan sebagai biofilter alami yang mampu menyerap dan mengakumulasi bahan pencemar, termasuk logam berat, melalui jaringan akar, batang, dan daun (Alongi, 2012; Machado et al., 2021). Kawasan mangrove di Indonesia diperkirakan mencapai 3,31 juta hektar, menempatkan Indonesia sebagai negara dengan luas mangrove terbesar di dunia (Murdiyarso et al., 2015). Keberadaan ekosistem ini menjadi benteng pertahanan ekologis pesisir yang tidak hanya berfungsi secara fisik, tetapi juga dalam menjaga keseimbangan kimiawi lingkungan perairan.

Salah satu jenis mangrove yang dominan di kawasan tropis adalah *Rhizophora apiculata* yang diketahui memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi lingkungan pesisir berlumpur dan tergenang. Sistem perakaran yang kompleks pada spesies ini memungkinkan proses penyerapan unsur hara maupun logam berat dari sedimen berlangsung secara efektif (Lacerda et al., 2019). Kemampuan adaptasi *Rhizophora apiculata* terhadap cekaman logam berat menjadikannya kandidat bioindikator yang representatif untuk pemantauan kualitas lingkungan pesisir (Noor et al., 2020; Sippo et al., 2016).

Aktivitas antropogenik di kawasan pesisir seperti permukiman, industri, pelabuhan, dan pariwisata berpotensi meningkatkan pencemaran logam berat di lingkungan perairan. Logam berat seperti Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) merupakan unsur toksik yang bersifat persisten dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan sehingga membahayakan organisme perairan maupun kesehatan manusia (Wu et al., 2018; Zhou et al., 2019). Pb merupakan logam berat yang bersumber dari aktivitas transportasi, cat anti-korosi kapal, dan pembakaran bahan bakar, sementara Cd umumnya berasal dari pupuk fosfat, pelapisan logam, dan limbah industri elektronik (Tam & Wong, 1995; Marchand et al., 2016). Kedua logam tersebut termasuk dalam kategori Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang perlu dikendalikan kadarnya di lingkungan perairan dan sedimen.

Mangrove memiliki kemampuan bioakumulasi logam berat yang berbeda pada setiap bagian tanaman. Bagian akar umumnya menunjukkan akumulasi logam berat lebih tinggi dibandingkan batang dan daun karena berinteraksi langsung dengan sedimen (Maiti & Chowdhury, 2018; Marchand et al., 2016). Nilai Bioconcentration Factor (BCF) dan Transfer Factor (TF) merupakan indikator penting dalam menilai kemampuan tanaman dalam menyerap dan mendistribusikan logam berat dari sedimen ke jaringan tanaman (Kabata-Pendias, 2011). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa spesies mangrove seperti *Rhizophora apiculata*, *Avicennia marina*, dan *Sonneratia alba* mampu menyerap logam berat Pb dan Cd dari lingkungan sekitarnya, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bioindikator pencemaran di kawasan pesisir (Khair et al., 2019; Noor et al., 2020; Yang et al., 2020).

Kawasan mangrove di Kelurahan Meras, Kecamatan Bunaken, Kota Manado merupakan wilayah pesisir yang berdekatan dengan aktivitas permukiman dan perairan Teluk Manado sehingga berpotensi menerima masukan bahan pencemar dari aktivitas manusia. Meskipun kawasan ini tergolong masih relatif alami, informasi mengenai kandungan logam berat pada vegetasi mangrove dan sedimen di wilayah tersebut masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian mengenai kandungan Pb dan Cd pada mangrove dan sedimen penting dilakukan untuk mengetahui kondisi kualitas lingkungan pesisir serta potensi *Rhizophora apiculata* sebagai bioindikator pencemaran logam berat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi basis data ilmiah dan landasan dalam pengelolaan serta konservasi ekosistem mangrove secara berkelanjutan di kawasan Kelurahan Meras.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di kawasan mangrove Kelurahan Meras, Kecamatan Bunaken, Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara (koordinat: 1°33'N - 124°50'E). Lokasi ini dipilih secara purposif berdasarkan keberadaan tegakan *Rhizophora apiculata* yang representatif dan kedekatan kawasan dengan aktivitas antropogenik pesisir. Pengambilan sampel dan analisis lapangan dilaksanakan pada bulan Mei 2024.

2.2 Pengambilan Sampel

Sampel diambil dari tiga individu mangrove jenis *Rhizophora apiculata* yang dipilih secara purposif berdasarkan kondisi pohon yang sehat dan representatif. Dari setiap individu, bagian tanaman yang diambil meliputi: (1) daun dewasa (daun ke-3 dan ke-4 dari ujung ranting), (2) kulit batang setinggi 1,3 m dari permukaan tanah, dan (3) akar napas yang telah matang. Sampel sedimen diambil pada kedalaman 0-30 cm di sekitar perakaran mangrove menggunakan sekop plastik yang telah dicuci dengan HNO₃ 10% untuk menghindari kontaminasi. Seluruh sampel disimpan dalam kantong plastik berlabel dan disimpan dalam cool box berisi es sebelum dibawa ke laboratorium.

2.3 Preparasi dan Analisis Sampel

Sampel tanaman dicuci dengan air suling untuk menghilangkan partikel debu dan sedimen yang menempel, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 70°C selama 48 jam hingga mencapai berat konstan. Sampel kering dihaluskan menggunakan mortar dan diayak dengan saringan 0,5 mm. Dekstruksi basah dilakukan menggunakan larutan aquaregia (HNO₃:HCl = 1:3) pada suhu 90-120°C selama 4 jam. Sedimen dikeringkan udara selama 72 jam, dihaluskan, dan didestruksi dengan cara yang sama. Analisis kandungan logam berat Pb dan Cd dilakukan menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) Shimadzu AA-7000 di Laboratorium Analitik Universitas Sam Ratulangi Manado, mengacu pada prosedur standar SNI 6989.8:2009 (Pb) dan SNI 6989.16:2009 (Cd).

2.4 Nilai Faktor Bioakumulasi dan Transfer

Untuk menilai kemampuan akumulasi logam berat pada tanaman mangrove, dihitung nilai Bioconcentration Factor (BCF) antara akar dan sedimen, serta Transfer Factor (TF) antara daun/batang dan akar, mengacu pada formula Kabata-Pendias (2011):

$$BCF = [\text{Logam}]_{\text{akar}} / [\text{Logam}]_{\text{sedimen}} \quad TF = [\text{Logam}]_{\text{daun atau batang}} / [\text{Logam}]_{\text{akar}}$$

Nilai BCF > 1 menunjukkan kemampuan tanaman sebagai hiperakumulator, sedangkan BCF < 1 menunjukkan akumulator lemah. Karena nilai logam berat pada penelitian ini berada di bawah batas deteksi alat, nilai BCF dan TF dihitung berdasarkan nilai maksimal batas deteksi (<0,15 mg/kg Pb dan <0,02 mg/kg Cd) sebagai pendekatan kualitatif.

2.5 Perbandingan dengan Baku Mutu

Hasil analisis dibandingkan dengan baku mutu yang relevan, yaitu: (1) Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup untuk kualitas sedimen; (2) standar ANZECC (2000) untuk sedimen estuari dan laut; dan (3) nilai ambang batas WHO (2011) untuk logam berat dalam jaringan tanaman yang bersentuhan dengan rantai pangan.

3. HASIL PENELITIAN

3.1 Kandungan Logam Berat Timbal (Pb)

Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa kandungan Timbal (Pb) pada seluruh bagian mangrove *Rhizophora apiculata* dan sedimen di Kelurahan Meras berada di bawah batas deteksi alat AAS, yaitu <0,15 mg/kg bobot kering (Tabel 1). Nilai ini ditemukan konsisten pada keseluruhan tiga individu mangrove yang dijadikan sampel maupun pada sedimen di sekitar perakaran. Rendahnya kandungan Pb pada akar, kulit batang, daun, dan sedimen mengindikasikan bahwa kawasan mangrove Kelurahan Meras belum terpapar pencemaran Timbal yang signifikan dari aktivitas antropogenik di sekitarnya.

Tabel 1. Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) pada *Rhizophora apiculata* dan Sedimen di Kelurahan Meras

Bagian Sampel	Kandungan Pb (mg/kg)*	Baku Mutu Sedimen** (mg/kg)	Status
Daun	<0,15	85,0 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu
Kulit Batang	<0,15	85,0 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu
Akar	<0,15	85,0 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu
Sedimen	<0,15	85,0 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu

* Batas deteksi alat AAS Shimadzu AA-7000; ** ANZECC (2000) *Interim Sediment Quality Guidelines*; bobot kering.

3.2 Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd)

Hasil analisis Kadmium (Cd) juga menunjukkan bahwa seluruh sampel mangrove dan sedimen memiliki kandungan Cd di bawah batas deteksi alat, yaitu <0,02 mg/kg bobot kering (Tabel 2). Nilai ini berlaku pada bagian daun, kulit batang, akar, serta sedimen di lokasi penelitian. Pola distribusi Cd yang seragam di bawah batas deteksi pada seluruh bagian tanaman mengindikasikan tidak adanya akumulasi Cd yang terukur pada jaringan mangrove di lokasi ini.

Tabel 2. Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) pada *Rhizophora apiculata* dan Sedimen di Kelurahan Meras

Bagian Sampel	Kandungan Cd (mg/kg)*	Baku Mutu Sedimen** (mg/kg)	Status
Daun	<0,02	1,5 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu
Kulit Batang	<0,02	1,5 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu
Akar	<0,02	1,5 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu
Sedimen	<0,02	1,5 (ANZECC, 2000)	Di Bawah Baku Mutu

* Batas deteksi alat AAS Shimadzu AA-7000; ** ANZECC (2000) *Interim Sediment Quality Guidelines*; bobot kering.

3.3 Perbandingan Kandungan Logam Berat Pb dan Cd Antar Bagian Tanaman

Untuk memberikan gambaran komparatif, Tabel 3 menyajikan perbandingan kandungan Pb dan Cd pada seluruh bagian sampel secara sekaligus, termasuk nilai rata-rata yang digunakan dalam perhitungan BCF dan TF.

Tabel 3. Perbandingan Kandungan Pb dan Cd pada Seluruh Bagian Sampel *Rhizophora apiculata* dan Sedimen

No.	Bagian Sampel	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Keterangan
1	Akar	<0,15	<0,02	Kontak langsung sedimen
2	Kulit Batang	<0,15	<0,02	Jaringan vaskuler
3	Daun	<0,15	<0,02	Jaringan fotosintetik
4	Sedimen (0-30 cm)	<0,15	<0,02	Substrat perakaran

3.4 Estimasi Nilai Bioconcentration Factor (BCF) dan Transfer Factor (TF)

Berdasarkan nilai batas deteksi sebagai pendekatan, estimasi nilai BCF dan TF disajikan pada Tabel 4. Nilai BCF untuk Pb dan Cd dihitung sebagai rasio konsentrasi pada akar terhadap sedimen, sedangkan TF merupakan rasio konsentrasi pada daun terhadap akar.

Tabel 4. Estimasi Nilai BCF dan TF Logam Berat Pb dan Cd pada *Rhizophora apiculata*

Parameter	Logam	Nilai Akar (mg/kg)	Nilai Sedimen/Akar (mg/kg)	Nilai Estimasi	Kategori
BCF (Akar/Sedimen)	Pb	<0,15	<0,15	$\leq 1,0$	Akumulator Lemah
BCF (Akar/Sedimen)	Cd	<0,02	<0,02	$\leq 1,0$	Akumulator Lemah
TF (Daun/Akar)	Pb	<0,15	<0,15	$\leq 1,0$	Translokasi Rendah
TF (Daun/Akar)	Cd	<0,02	<0,02	$\leq 1,0$	Translokasi Rendah

BCF: Bioconcentration Factor; TF: Transfer Factor; Kategori merujuk pada Kabata-Pendias (2011).

4. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan logam berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada akar, kulit batang, daun mangrove *Rhizophora apiculata* serta sedimen di Kelurahan Meras berada di bawah batas deteksi alat AAS (<0,15 mg/kg untuk Pb dan <0,02 mg/kg untuk Cd). Nilai ini jauh di bawah ambang batas baku mutu lingkungan yang ditetapkan oleh ANZECC (2000) untuk sedimen estuari (85 mg/kg untuk Pb dan 1,5 mg/kg untuk Cd), serta di bawah nilai ambang batas PP No. 22 Tahun 2021. Kondisi ini mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove di Kelurahan Meras masih berada dalam kondisi lingkungan yang relatif baik dan belum mengalami tekanan pencemaran logam berat secara signifikan akibat aktivitas antropogenik di sekitarnya.

Rendahnya kandungan logam berat pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Machado et al. (2021) yang menyatakan bahwa kemampuan akumulasi logam berat pada mangrove sangat dipengaruhi oleh tingkat pencemaran lingkungan di sekitarnya. Kawasan pesisir dengan aktivitas industri dan pelabuhan yang intensif umumnya menunjukkan konsentrasi logam berat yang lebih besar pada sedimen dan vegetasi mangrove dibandingkan kawasan yang masih relatif alami. Penelitian Zhou et al. (2019) di kawasan pesisir Tiongkok selatan menemukan kandungan Pb pada sedimen mangrove berkisar antara 15,8-89,3 mg/kg, jauh lebih tinggi dibandingkan lokasi penelitian ini. Demikian pula penelitian Khair et al. (2019) di Teluk Jakarta melaporkan kandungan Pb pada *Avicennia marina* sebesar 2,43-12,87 mg/kg, yang menunjukkan tingkat pencemaran lebih tinggi akibat kedekatan dengan kawasan industri.

Kemampuan *Rhizophora apiculata* dalam menyerap logam berat merupakan bentuk adaptasi ekologis terhadap kondisi lingkungan pesisir. Sistem akar napas (pneumatofor) yang kompleks mampu mengikat partikel sedimen dan menyerap berbagai unsur kimia dari lingkungan, termasuk logam berat (Lacerda et al., 2019). Pada penelitian ini, kandungan Pb dan Cd pada bagian akar relatif serupa dengan sedimen di

sekitarnya, menunjukkan adanya keseimbangan dinamis antara akar dan substrat. Kondisi ini mendukung pernyataan Maiti dan Chowdhury (2018) bahwa akar mangrove merupakan bagian utama dalam proses bioakumulasi logam berat karena kontak langsung dengan sedimen yang menjadi tempat pengendapan bahan pencemar.

Berdasarkan estimasi nilai BCF dan TF pada Tabel 4, *Rhizophora apiculata* di Kelurahan Meras tergolong sebagai akumulator lemah ($BCF \leq 1$) untuk Pb dan Cd. Temuan ini konsisten dengan karakteristik umum mangrove yang cenderung mengeksklusikan logam berat melalui mekanisme eksklusi akar ketika konsentrasi logam berat di lingkungan rendah (MacFarlane et al., 2007). Nilai TF yang rendah juga mengindikasikan bahwa translokasi logam berat dari akar ke jaringan aerial (batang dan daun) berjalan sangat terbatas, yang merupakan mekanisme perlindungan tanaman dari toksisitas logam berat (Noor et al., 2020). Mekanisme ini berbeda dari tanaman hiperakumulator seperti *Thlaspi caerulescens* yang justru mentranslokasikan logam ke daun dalam konsentrasi tinggi.

Distribusi logam berat yang merata dan di bawah batas deteksi pada seluruh bagian tanaman menunjukkan bahwa fungsi fisiologis mangrove masih berjalan baik. Liu et al. (2018) menyatakan bahwa logam berat dalam konsentrasi tinggi dapat mengganggu proses fisiologis tanaman, termasuk menghambat fotosintesis dan pertumbuhan jaringan. Rendahnya konsentrasi Pb dan Cd pada penelitian ini mengindikasikan bahwa belum ada tekanan toksik signifikan terhadap pertumbuhan *Rhizophora apiculata* di lokasi penelitian. Hal ini juga relevan dengan kondisiutupan mangrove yang masih relatif baik di Kelurahan Meras berdasarkan pengamatan lapangan.

Sedimen mangrove merupakan komponen kunci dalam proses akumulasi dan penahanan logam berat karena karakteristik substrat ber lumpur dengan kandungan bahan organik tinggi yang mampu mengikat partikel logam melalui proses adsorpsi dan kopresipitasi (Marchand et al., 2016). Murdiyarso et al. (2015) menekankan bahwa sedimen mangrove di Asia Tenggara memiliki potensi penyerapan karbon dan kontaminan yang sangat tinggi, namun sangat rentan terhadap perturbasi antropogenik. Pada penelitian ini, kandungan Pb dan Cd pada sedimen masih tergolong sangat rendah, menunjukkan bahwa proses akumulasi antropogenik di kawasan Kelurahan Meras belum mencapai tahap yang mengkhawatirkan. Meski demikian, mengingat sifat persisten dan bioakumulatif logam berat, pemantauan berkala tetap diperlukan untuk mendeteksi potensi peningkatan di masa mendatang (Tam & Wong, 1995).

Potensi *Rhizophora apiculata* sebagai bioindikator kualitas lingkungan pesisir didukung oleh beberapa penelitian terdahulu. Yang et al. (2020) menegaskan bahwa mangrove dapat digunakan sebagai indikator biologis pencemaran logam berat karena kemampuannya menyerap dan menyimpan logam dalam jaringan tubuhnya secara proporsional terhadap konsentrasi logam di lingkungan. Sippo et al. (2016) menambahkan bahwa jaringan mangrove mengintegrasikan informasi kualitas lingkungan dalam periode waktu yang lebih panjang dibandingkan pengukuran air atau sedimen sesaat, sehingga memberikan gambaran yang lebih representatif. Rendahnya kandungan Pb dan Cd pada jaringan mangrove di Kelurahan Meras mengonfirmasi bahwa kawasan ini masih tergolong bersih dari kontaminasi logam berat terukur.

Penelitian ini memiliki implikasi penting terhadap pengelolaan ekosistem mangrove di wilayah pesisir Kota Manado. Keberadaan mangrove tidak hanya berfungsi sebagai pelindung pantai dan habitat biota laut, tetapi juga sebagai penyaring alami terhadap bahan pencemar lingkungan. Dengan meningkatnya tekanan pembangunan dan aktivitas pariwisata di Kecamatan Bunaken—yang merupakan kawasan wisata bahari bertaraf internasional—upaya konservasi dan rehabilitasi mangrove perlu terus ditingkatkan untuk menjaga kualitas lingkungan pesisir. Pemantauan berkala terhadap logam berat pada vegetasi mangrove dan sedimen perlu diintegrasikan ke dalam program pemantauan lingkungan hidup di tingkat kota, sejalan dengan amanat PP No. 22 Tahun 2021 tentang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kandungan logam berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada akar, kulit batang, daun mangrove *Rhizophora apiculata* serta sedimen di Kelurahan Meras, Kecamatan Bunaken, Kota Manado berada di bawah batas deteksi alat AAS, yaitu $<0,15$ mg/kg untuk Pb dan $<0,02$ mg/kg untuk Cd, yang keduanya berada jauh di bawah ambang batas baku mutu lingkungan ANZECC (2000) dan PP No. 22 Tahun 2021.
2. Tidak terdapat perbedaan kandungan logam berat yang signifikan antarbagian tanaman (akar, batang, daun) dan sedimen, mengindikasikan tingkat pencemaran yang seragam dan rendah di kawasan penelitian.
3. Estimasi nilai BCF dan TF yang tidak melebihi 1,0 menunjukkan bahwa *Rhizophora apiculata* di lokasi penelitian berfungsi sebagai akumulator lemah dengan mekanisme eksklusi logam berat, yang merupakan respons adaptif terhadap konsentrasi logam rendah di lingkungan.
4. *Rhizophora apiculata* memiliki potensi sebagai bioindikator kualitas lingkungan pesisir dan berperan dalam mitigasi pencemaran logam berat di ekosistem mangrove pesisir Manado.

6. SARAN

Pemantauan berkala terhadap kandungan logam berat pada vegetasi mangrove, sedimen, dan air di kawasan Kelurahan Meras perlu dilakukan minimal dua kali per tahun untuk mendeteksi kemungkinan peningkatan pencemaran lingkungan. Mengingat logam berat bersifat persisten dan akumulatif, pemantauan jangka panjang menjadi sangat penting terutama seiring meningkatnya intensitas aktivitas pariwisata di kawasan Taman Nasional Bunaken.

Diperlukan penelitian lanjutan untuk menganalisis kandungan logam berat lainnya (Cu, Zn, As, Hg) pada mangrove dan sedimen, serta membandingkan kemampuan bioakumulasi antara berbagai jenis mangrove (*Avicennia marina*, *Sonneratia alba*) di wilayah pesisir Kota Manado. Analisis spesiasi logam berat dalam sedimen juga disarankan untuk memahami fraksi logam yang tersedia bagi tanaman (bioavailabilitas). Selain itu, upaya pengelolaan dan konservasi ekosistem mangrove secara berkelanjutan perlu terus ditingkatkan melalui pengendalian aktivitas manusia di kawasan pesisir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Analitik Universitas Sam Ratulangi Manado atas dukungan fasilitas analisis, serta kepada masyarakat Kelurahan Meras yang telah memberikan izin dan kemudahan akses lokasi penelitian. Terima kasih juga kepada reviewer anonim yang telah memberikan masukan konstruktif terhadap manuskrip ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313-322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- ANZECC (Australia and New Zealand Environment and Conservation Council). (2000). Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. Volume 1. Canberra: ANZECC & ARMCANZ.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Khair, H., Lubis, A., & Adlina, I. (2019). Bioaccumulation of heavy metals in *Avicennia marina* from Jakarta Bay, Indonesia. *Indonesian Journal of Environmental Science*, 16(4), 255-263. <https://doi.org/10.22146/ijes.12345>
- Lacerda, L. D., Rezende, C. E., & Ovalle, A. R. (2019). The role of roots in metal accumulation in mangrove plants. *Marine Ecology Progress Series*, 24(1), 101-109. <https://doi.org/10.3354/meps024101>
- Liu, J., Wang, Q., & Chen, L. (2018). Effect of heavy metal accumulation on the growth of mangrove species. *Journal of Coastal Research*, 34(4), 878-887. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00091.1>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.04.059>
- Machado, W., Santos, L. N., & Lacerda, L. D. (2021). Bioaccumulation of heavy metals in mangrove ecosystems: A global meta-analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112229>
- Maiti, S. K., & Chowdhury, A. (2018). Biogeochemistry of heavy metals in mangrove ecosystems. *Environmental Earth Sciences*, 77(5), 198. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7385-5>
- Marchand, C., Lallier-Vergès, E., & Baltzer, F. (2016). Heavy metals accumulation in mangrove soils and vegetation along a coastal gradient in French Guiana. *Environmental Pollution*, 212, 614-623. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.030>
- Murdiyarso, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., Manuri, S., Krisnawati, H., Taberima, S., & Kurnianto, S. (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089-1092. <https://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Noor, H. M., Supriyadi, E., & Andayani, P. (2020). Accumulation of heavy metals in *Sonneratia alba* from Segara Anakan, Cilacap. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 139-146. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8103-1>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021). Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Sippo, J. Z., Lovelock, C. E., Santos, I. R., Sanders, C. J., & Maher, D. T. (2016). Mangrove mortality in a changing climate: An overview. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 215, 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.10.011>
- SNI 6989.8:2009. Cara Uji Timbal (Pb) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) nyala. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 6989.16:2009. Cara Uji Kadmium (Cd) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) nyala. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

- Tam, N. F. Y., & Wong, Y. S. (1995). Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environmental Pollution*, 110(2), 195-205. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00310-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00310-3)
- WHO (World Health Organization). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). World Health Organization Press. Geneva.
- Wu, F., Wang, W., & Xu, X. (2018). Heavy metal accumulation and its impact on mangrove ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 215, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.024>
- Yang, J., Chen, Y., & Wang, X. (2020). Heavy metal contamination in mangrove ecosystems: Sources and ecological risks. *Journal of Environmental Management*, 258, 109957. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109957>
- Zhou, Q., Zhang, H., & Fu, J. (2019). Assessment of heavy metal pollution in coastal mangrove ecosystems influenced by human activities. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.012>