

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Pencemaran daerah pesisir disebabkan karena masuknya bahan pencemar ke laut seperti limbah rumah tangga, limbah industri, penggunaan bahan bakar, aktivitas kapal dan lainnya. Pencemaran yang terjadi pada perairan dapat merugikan ekosistem laut karena bahan pencemar yang melebihi standar baku mutu pada air laut dan sedimen akan masuk melalui sistem rantai makanan. Bahan-bahan pencemar tersebut menjadi faktor meningkatnya konsentrasi logam di pesisir. Logam sulit didegradasi oleh makhluk hidup dan mudah terakumulasi di lingkungan. Secara umum, logam terbagi atas dua jenis antara lain logam esensial dan logam non esensial. Logam esensial masih dibutuhkan makhluk hidup dalam konsentrasi rendah, namun akan bersifat toksik jika melebihi batas toleransi. Contoh logam esensial adalah Zn, Cu, Fe dan Mg (Samosir et al., 2023). Sedangkan logam non esensial akan bersifat toksik meskipun dalam konsentrasi yang rendah, contohnya seperti logam Pb, Cd, H, dan Cr (Irianti et al., 2017). Jika logam yang diserap oleh tumbuhan melebihi batas toleransi, maka akan memberikan dampak negatif pada morfologi, proses kimia, biokimia, fisiologi dan struktur tumbuhan. Perubahan tersebut seperti terjadinya klorosis, perubahan warna, nekrosis dan kematian pada tumbuhan. Agar logam pada perairan dapat terkendali, penggunaan vegetasi mangrove merupakan salah satu vegetasi perairan yang dapat menanggulangi pencemaran logam dan mangrove hidup di daerah yang menerima dampak langsung pembuangan bahan pencemaran dari daratan (Utami et al., 2018).

Mangrove menurut etimologi berasal dari bahasa portugis yaitu *mangue* yang berarti tumbuhan, dan *grove* dari bahasa inggris yang berarti belukar. Menurut terminologi, hutan mangrove adalah hutan yang tumbuh di air payau yang lingkungannya bersalinitas tinggi dan dipengaruhi oleh pasang surut air laut (Utami et al., 2018). Taluke et al. (2019) mengatakan bahwa definisi mangrove ialah tumbuhan yang hidup di daerah pasang surut yang berasosiasi dengan fauna maupun mikroorganisme. Mangrove termasuk tumbuhan tingkat tinggi pada kawasan pesisir dengan kemampuannya menyerap logam pada organ-organ tubuhnya seperti pada daun, batang, terlebih pada akar yang mengendap dalam sedimen. Tumbuhan mangrove dapat berfungsi sebagai fitoremediasi atau salah satu upaya mangrove untuk mengurangi pencemaran lingkungan (Sanadi et al., 2018). Mangrove mampu untuk menyaring, mengikat serta memerangkap polutan dari alam bebas. Mangrove berperan sebagai agen bioremediasi alami karena secara alami mampu menyerap kandungan logam baik logam esensial maupun non esensial. Proses penyerapan logam setelah diserap oleh mangrove berperan sebagai filter penting untuk logam (Utami et al., 2018).

Hamuna et al. (2018) mengungkapkan bahwa kandungan logam dalam perairan dipengaruhi oleh berbagai parameter fisik-kimia. Suhu sebagai salah satu parameter fisik, memiliki pengaruh terhadap kelarutan logam di kolom air. Peningkatan suhu

perairan dapat meningkatkan akumulasi dan toksisitas logam karena peningkatan metabolisme organisme air. Semakin rendah suhu perairan akan mengakibatkan pengendapan logam di sedimen, sedangkan suhu yang tinggi menyebabkan logam larut dalam air (Ishak et al., 2023). pH air juga memiliki peran penting dalam kelarutan logam. Kelarutan logam dalam air meningkat pada pH rendah, yang berpotensi meningkatkan toksisitasnya. Sebaliknya, peningkatan pH air umumnya mengurangi kelarutan logam tersebut, sehingga menurunkan toksisitas logam (Andini, 2021). Salinitas di perairan berbanding terbalik dengan akumulasi logam. Salinitas yang tinggi cenderung akan menurunkan akumulasi logam di perairan (Fendjalang et al., 2022). Kandungan oksigen terlarut (DO) memengaruhi kandungan logam dalam sedimen. DO tinggi menciptakan kondisi oksidatif (Eh) yang memengaruhi potensi redoks sedimen, sedangkan DO rendah menciptakan kondisi reduktif yang menyebabkan logam kurang larut dan mudah teradsorpsi atau mengendap di sedimen (Najamuddin et al., 2020). Bahan organik total (BOT) dalam sedimen berperan sebagai pengikat logam, yang kemudian dapat diakumulasi oleh akar mangrove. Sedimen dengan kandungan BOT tinggi cenderung mengakumulasi logam dalam jumlah besar (Kinasih & Purnomo, 2015). Selain itu, tipe sedimen juga mempengaruhi kandungan logam. Partikel sedimen halus memiliki luas permukaan yang lebih besar dan kerapatan ion yang lebih stabil untuk mengikat logam dibandingkan partikel sedimen kasar (Awaliyah, 2018).

Dermaga Sabang merupakan suatu dermaga yang terletak di Kecamatan Bontoa, Kabupaten Maros yang menjadi tempat persinggahan kapal dari pulau-pulau sekitar serta menjadi jalur lalu lintas kapal nelayan. Dermaga Sabang juga sering dijadikan tempat berkumpul masyarakat pada sore hari untuk melihat matahari terbenam. Pada perairan dermaga Sabang, terdapat banyak ekosistem mangrove yang terdapat di wilayah pesisir dengan jenis mangrove pada lokasi tersebut yaitu *Avicennia* sp. dan *Rhizophora* sp.

Berdasarkan uraian-uraian permasalahan di atas, maka penting untuk mengukur kandungan logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) dalam sedimen dan akar mangrove untuk mengetahui kemampuan mangrove menjadi agen fitoremediasi di Dermaga Sabang, Kecamatan Bontoa, Sulawesi Selatan.

1.2 Tujuan dan manfaat

Penelitian ini bertujuan mengukur efektivitas akar mangrove *Rhizophora* sp. dan *Avicennia* sp. sebagai agen fitoremediasi dalam menyerap dan mengakumulasi logam Pb dan Cu di perairan Dermaga Sabang, Kabupaten Maros, Sulawesi Selatan.

Penelitian ini diharapkan dapat menyediakan informasi mengenai peran mangrove yang dapat menjadi solusi dalam mengatasi pencemaran lingkungan utamanya pada wilayah pesisir.

1.3 Landasan teori

1.3.1 Logam

Logam merupakan senyawa berbahaya karena tidak dapat dihancurkan oleh mikroorganisme hidup di lingkungan dan dapat terakumulasi pada lingkungan. Logam dapat berpindah dari satu lingkungan ke lingkungan lainnya melalui biomagnifikasi atau melalui rantai makanan. Logam dalam memberikan dampak *lethal* maupun *sub lethal* terhadap biota perairan seperti terganggunya pertumbuhan, perilaku, dan karakteristik atau morfologi berbagai organisme akuatik (Zulkarnain, 2022). Logam terdiri dari dua kelompok yaitu logam esensial dan non esensial. Logam esensial dibutuhkan oleh makhluk hidup pada jumlah tertentu namun akan bersifat toksik jika dikonsumsi secara berlebihan. Contoh logam esensial yaitu seperti Zn, Cu, Fe, Co, Mn dan lain-lain. Sedangkan logam non esensial belum diketahui manfaatnya dalam tubuh serta bersifat toksik. Contohnya seperti Cd, Cr, Pb, Hg dan lain-lain (Zulkarnain, 2022).

Pemanfaatan berlebihan sumber daya kelautan dan perikanan dapat menghasilkan limbah logam seperti timbal (Pb) dan tembaga (Cu) dari aktivitas industri, seperti baterai dan kawat listrik (Utami et al., 2018). Logam dapat masuk ke perairan melalui udara yang terbawa hujan dan mengendap di sedimen karena sulit terurai. Akumulasi logam meningkat seiring waktu, tergantung kondisi lingkungan perairan (Anggraini & Puryanti, 2019). Konsentrasi logam di sedimen lebih tinggi dibandingkan di air karena mudah berikatan dengan bahan organik, terutama pada sedimen halus (Hutagalung et al., 1997; Handayani et al., 2020). Menurut Samosir et al. (2023) logam yang masuk ke lingkungan perairan akan mengalami pengendapan, pengenceran dan dispersi, lalu diserap oleh organisme. Tumbuhan, termasuk mangrove, menyerap logam melalui akar dan mentranslokasikannya ke organ lain. Akar mangrove memiliki sistem penyaringan logam, namun tetap terjadi penumpukan logam di akar jika penyerapan tetap dilakukan (Ismail et al., 2020).

Logam timbal (Pb). Timbal atau dikenal dengan timah hitam, dengan nama ilmiah *Plumbum* (Pb) yaitu logam yang bersifat lipofilik, logam yang mudah larut dalam lemak. Timbal bersifat sulit larut dalam air dingin, air panas serta air asam. Namun timbal dapat larut dalam asam nitrit, asam asetat, serta asam sulfat pekat (Darmiah, 2015). Menurut Darmiah (2015), logam Pb di perairan dapat muncul secara alami dan sebagai dampak dari aktivitas antropogenik. Secara alami, logam Pb mengalami pengkristalan di udara, serta logam Pb berasal dari hasil korosifikasi batuan mineral akibat hempasan gelombang dan angin lalu akan masuk ke perairan dengan bantuan air hujan. Logam Pb akibat aktivitas antropogenik dapat berasal dari proses industri, makanan, rokok, air minum dan limbah domestik. Limbah domestik meliputi bahan bakar atau bensin, cat rumah, peluru timbal, pipa ledeng, mainan dan keran (Irianti et al., 2017). Penelitian Samosir et al. (2023) membuktikan bahwa logam Pb termasuk logam non esensial sehingga akumulasi logam Pb lebih sedikit di tumbuhan dibandingkan pada sedimen. Logam Pb yang terakumulasi pada air dan sedimen tentunya akan memberikan dampak toksik bagi organisme di dalamnya.

Logam tembaga (Cu). Tembaga dikenal dengan lambang Cu atau *Cuprum*. Tembaga termasuk dalam golongan logam esensial, artinya logam yang dibutuhkan oleh organisme dalam jumlah sedikit, namun akan berdampak negatif jika melewati batas toleransi suatu organisme (Kadir, 2021). Cu diserap oleh tumbuhan dalam bentuk Cu^{2+} yang digunakan pada proses oksidasi, reduksi, serta pembentukan enzim. Cu sangat dibutuhkan oleh tumbuhan untuk pertumbuhan jaringan terutama pada jaringan daun, dimana terjadi proses fotosintesis di daun (Samosir et al., 2023). Cu dapat masuk ke lingkungan secara alami maupun akibat dari aktivitas antropogenik. Batuan mineral yang mengalami erosi akan menghasilkan Cu, partikel Cu yang berada di udara akan terbawa turun oleh air hujan serta pengikisan batuan (Hakim et al., 2016). Namun, masukan Cu akibat dari aktivitas manusia juga dapat terjadi. Hal ini dikarenakan beberapa aktivitas seperti limbah industri, industri galangan kapal yang menggunakan Cu sebagai campuran bahan pengawet, industri pengolahan kayu serta buangan rumah tangga. Selain itu, Cu juga banyak digunakan sebagai campuran cat *antifouling*, campuran insektisida dan fungisida (Kadir, 2021).

1.3.2 Peran dan fungsi mangrove

Mangrove hidup dengan modifikasi akar dan daun sehingga mampu untuk hidup pada berbagai macam substrat yang masih terpengaruh oleh pasang surut (Hamzah & Pancawati, 2013). Terdapat 3 fungsi mangrove bagi lingkungan maupun bagi masyarakat. Mangrove, magal, bakau, hutan pantai, dan hutan api-api merupakan sebutan untuk komunitas tumbuhan pantai yang memiliki kemampuan khusus dibandingkan tumbuhan lainnya. Selain itu, hutan mangrove juga menjadi tempat mencari makan (*feeding ground*), tempat bertelur dan memijah (*spawning ground*), tempat organisme untuk mengasuh dan membesarkan anaknya, serta dijadikan sebagai tempat berlindung dari predator oleh berbagai juvenile dan larva ikan serta karang (*shellfish*). Pernyataan tersebut didukung oleh pernyataan Nurrachmi et al. (2019) bahwa akar nafas pada mangrove dapat mencegah pengendapan lumpur, sehingga proses sedimentasi akan membutuhkan waktu yang lama. Selain itu, akar tunggang pada mangrove digunakan hewan-hewan untuk menempel, tempat berlindung bagi anak-anak ikan, mollusca dan crustacea dari serangan predator.

Secara fisik, mangrove tumbuh di bibir pantai berfungsi untuk melindungi pantai dari erosi, angin topan dan gelombang laut, mempercepat perluasan lahan melalui proses sedimentasi, dan mengurangi risiko terhadap bahaya tsunami (Setiawan, 2015). Secara ekonomis, mangrove berfungsi penghasil kayu bakar, arang, madu, obat-obatan, tanin (zat penyamak kulit), serat sintesis maupun bahan bangunan. Selain itu juga, keindahan dari hutan mangrove menjadikan hutan mangrove dapat difungsikan sebagai tempat wisata (Nurrachmi et al., 2019 dan Idrus et al., 2019).

Vegetasi mangrove memiliki kemampuan dalam mengakumulasi logam dan mengurangi tingkat konsentrasi bahan pencemar di perairan atau dikenal sebagai *pollutant trap*. Mangrove dapat dijadikan sebagai bioindikator tingkat pencemaran logam pada perairan (Setiawan, 2015). Logam masuk ke dalam tanaman dalam bentuk kation atau anion. Absorpsi logam terjadi di ujung akar dan terserap pada

epidermis akar. Kemudian logam akan bergerak menuju pembuluh kayu (*xylem*) melalui sitoplasma untuk bergerak menuju sel lainnya. Setelah diabsorpsi oleh akar, logam akan ditranslokasikan ke seluruh bagian tanaman. Akar tanaman menyerap logam dengan cara mengkombinasikan luas permukaan yang lebih besar dengan ketertarikan reseptor kimia yang tinggi. Logam dan unsur hara lainnya akan berikatan dengan permukaan akar. Logam akan ditahan dalam sel akar kemudian diangkut menggunakan simplas ke stele, dan kemudian dilepas ke *xylem* yang dibantu oleh membran pengangkutan protein (Wulandari et al., 2018). Mangrove dapat melemahkan efek racun melalui pengenceran, yaitu dengan menyimpan air untuk mengencerkan logam dalam jaringan tubuhnya sehingga dapat mengurangi toksisitas logam (Testi et al., 2019).

1.3.3 Mangrove *Rhizophora* sp.

Rhizophora sp. adalah salah satu jenis tanaman mangrove yang umum ditemui di Indonesia. *Rhizophora* sp. termasuk ke dalam famili *Rhizophoraceae*. Terdapat 3 jenis mangrove yang tergolong dalam genus *Rhizophora*, yaitu *Rhizophora mucronata*, *Rhizophora apiculata* dan *Rhizophora stylosa*. Jenis-jenis mangrove tersebut dikenal juga dengan nama bakau. Menurut Sari et al. (2024), mangrove jenis *Rhizophora mucronata* tumbuh pada zonasi bagian depan sampai tengah pada kawasan mangrove, sedangkan zona belakang ditumbuhi oleh jenis-jenis minor atau asosiasi. Hal tersebut disebabkan oleh substrat pada zona belakang memiliki ketebalan lumpur yang lebih pendek. Jenis mangrove tersebut termasuk ke dalam kategori mayor yang tumbuh pada daerah lumpur agak keras dan angkal, terkena air pasang harian, serta dapat membentuk tegakan murni (Hadi et al., 2016).

Habitus mangrove *Rhizophora* berupa pohon dengan tinggi pohon dewasa sekitar 15 meter. *Rhizophora* memiliki daun berbentuk memanjang lonjong dengan permukaan yang mengkilap, bagian pangkal daun berbentuk baji, tepi daun yang rata dan ujung daun yang meruncing disertai dengan duri. Tipe perakaran dari mangrove *Rhizophora* yaitu akar tunjang yang tumbuh keluar dari batang dan ke dalam substrat (Hadi et al., 2016). Adapun klasifikasi mangrove *Rhizophora* sp. Menurut Plantamor (2024) sebagai berikut:

Kingdom : Plantae

Division : Magnoliophyta

Class : Magnoliopsida

Order : Myrtales

Family : Rhizophoraceae

Genus : *Rhizophora*

Mangrove jenis *Rhizophora* merupakan jenis mangrove yang banyak hidup di wilayah pesisir. *Rhizophora* memiliki akar penyangga yang dapat menahan dan memantapkan sedimen, sehingga mencegah penyebaran bahan pencemar agar tidak meluas. Hal tersebut membuat mangrove jenis *Rhizophora* menyerap logam lebih optimal (Samosir et al., 2023). **Gambar 1** menampilkan morfologi mangrove jenis *Rhizophora* sp.



Gambar 1. Morfologi mangrove *Rhizophora* sp. Sumber: Handayani (2006)

1.3.4 Mangrove *Avicennia* sp.

Avicennia sp. merupakan salah satu jenis mangrove mayor sehingga sering dijumpai pada setiap ekosistem mangrove. Di Indonesia, terdapat 4 spesies dari *Avicennia*, yaitu *Avicennia alba*, *Avicennia marina*, *Avicennia officinalis* dan *Avicennia rumhiana*. Mangrove ini tumbuh berbentuk semak atau tumbuh sebagai pohon dengan tinggi 12 m pada tanah berlumpur, daerah tepi sungai, daerah kering serta bersifat *euryhaline* (batas toleran terhadap salinitas tinggi) (Halidah, 2014).

Mangrove jenis *Avicennia* dikenal juga sebagai mangrove api-api, akar dari mangrove ini adalah akar napas, akar tersebut memiliki percabangan yang tumbuh teratur secara vertikal dari akar horizontal yang terbenam di dalam tanah. *Avicennia* sp. memiliki tipe akar napas yang berbentuk seperti pensil, buah berbentuk seperti mangga dengan ujung yang tumpul dan panjang sekitar 1 cm. Daun mangrove berbentuk elips dengan ujung tumpul dengan permukaan atas daun berwarna hijau mengkilat dan sisi bawah berwarna hijau abu-abu dan suram. Sedangkan bunga mangrove *Avicennia* bertipe majemuk dengan pertumbuhan 8-14 tiap tangainya (Halidah, 2014). **Gambar 2** menampilkan morfologi mangrove *Avicennia* sp. Adapun Klasifikasi mangrove jenis *Avicennia* sp. menurut Plantamor (2024) sebagai berikut:

Kingdom : Plantae
 Division : Magnoliophyta
 Class : Magnoliopsida
 Order : Lamiales
 Family : Verbenaceae
 Genus : *Avicennia*



Gambar 2. Morfologi mangrove *Avicennia* sp. Sumber: Handayani (2006)

Avicennia sp. merupakan jenis spesies mangrove yang sangat ketat dalam penyerapan logam Pb bahkan mampu untuk tidak menyerap logam Pb sama sekali. Hal tersebut diduga karena barier pada akar mangrove *Avicennia* sp. menjadi penghalang bagi unsur-unsur logam untuk sampai ke berbagai jaringan tanaman yang sensitif. Jika konsentrasi logam pada sedimen melewati batas toleransi, mangrove akan mengurangi penyerapan logam (Yunasfi et al., 2020). *Avicennia* adalah jenis mangrove yang mampu hidup pada berbagai kisaran salinitas. *Avicennia* memiliki kemampuan untuk tumbuh dengan baik pada perairan dengan salinitas hampir tawar sampai dengan 90‰ (Sunarni et al., 2019).

Supriyantini & Soenardjo (2015) mengungkapkan bahwa mekanisme mangrove jenis *Avicennia* sp. untuk mengurangi toksisitas logam adalah dengan menyimpan banyak air pada vakuola sehingga dapat mengencerkan konsentrasi logam dalam organ tanaman (dilusi). Proses pengenceran yang dilakukan oleh *Avicennia* dengan cara menyimpan air pada organ daun lalu diikuti dengan penebalan daun. Cara kedua yaitu dengan melakukan ekskresi dengan cara menyimpan toksikan di dalam jaringan yang sudah tua. Logam yang diserap akan mengalami pengikatan dan penurunan daya racun karena diolah menjadi persenyawaan yang lebih sederhana. Hal tersebut membuat spesies *Avicennia* sp. dapat difungsikan sebagai pengendali pencemaran logam pada suatu perairan pesisir serta sebagai *pollutant trap*. *Avicennia* sp. mampu menyerap logam pada organ akarnya dan melokalisasikan logam tersebut ke organ lain, seperti daun, batang dan buah (Yunasfi et al., 2020).

1.4 Studi kasus

Penelitian mengenai penyerapan logam Pb dan Cu pada akar mangrove *Rhizophora* sp. dan *Avicennia* sp. telah dilakukan di berbagai perairan.

Penelitian Sari et al. (2024) bertujuan untuk menganalisis bioakumulasi logam Pb dan Cu pada *Rhizophora mucronata* di Pelabuhan Lembar, Kabupaten Lombok Barat, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Penelitian tersebut menggunakan sampel tanaman *Rhizophora mucronata* yaitu akar dan daun mangrove, serta sedimen yang berada di bawah tanaman tersebut dengan titik pengambilan sampel berjumlah 27 plot. Sehingga didapatkan rata-rata kandungan logam Pb sebesar 0,942 ppm dan

Cu sebesar 2,31 ppm pada *Rhizophora mucronata*. Berdasarkan hasil tersebut, akumulasi kandungan logam Pb dan Cu pada *Rhizophora mucronata* masih sesuai dengan batas toleransi kandungan logam Cu dan Pb pada tumbuhan. Sedangkan rata-rata kandungan logam Pb dan Cu pada sedimen didapatkan sebesar 0,0043 ppm dan 0,0869 ppm. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, kandungan logam Cu pada sedimen lebih tinggi dibandingkan kandungan logam Pb. Penulis mengungkapkan bahwa kandungan Cu di sedimen lebih tinggi dibandingkan Pb karena bahan pencemar akibat aktivitas antropogenik lebih besar daripada Pb.

Hamzah & Pancawati (2013) melakukan penelitian mengenai potensi fitoremediasi berdasarkan akumulasi dan translokasi logam Cu, Zn, dan Pb pada sedimen, akar dan daun mangrove *Avicennia marina*, *Rhizophora mucronata*, dan *Sonneratia caseolaris* di Hutan Lindung Angke Kapuk (HLAK) dan Taman Margasatwa Muara Angke (TMMA) di Jakarta Utara, Provinsi DKI Jakarta. Hasil kandungan logam pada sedimen menunjukkan hasil tertinggi pada logam Zn sebesar 210,21 – 274,37 mg/kg, kemudian logam Cu sebesar 52,19 – 59,66 mg/kg, dan terendah pada logam Pb sebesar 43,73 – 54,85 mg/kg. Hasil kandungan logam tertinggi pada akar terdapat logam Zn di akar mangrove *Avicennia marina* sebesar 68,35 mg/kg, sedangkan kandungan logam tertinggi pada daun terdapat logam Pb di daun *Avicennia marina* sebesar 58,57 mg/kg. Hasil pengukuran BAC (*Bioaccumulation Factor*), BCF (*Bioconcentration Factor*), dan TF (*Transformation Factor*) menunjukkan hasil $BAC/BCF/TF_{Pb} > BAC/BCF/TF_{Zn} > BAC/BCF/TF_{Cu}$. Penulis mengungkapkan bahwa *Sonneratia caseolaris* merupakan mangrove yang dapat dijadikan agen fitoremediasi.

Penelitian yang sama juga dilakukan Rachmawati et al. (2018) mengenai potensi *Avicennia alba* menjadi agen fitoremediasi dalam menyerap logam Pb dan Cu di perairan Wonorejo, Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Hasil kandungan logam Pb dan Cu pada sedimen didapatkan kandungan Cu sebesar 25,93 – 36,95 ppm sedangkan Pb sebesar 14,49 – 20,79 ppm. Hasil kandungan logam Pb dan Cu di akar dan daun *Avicennia alba* juga menunjukkan hal yang sama yaitu kandungan Cu lebih tinggi dibandingkan logam Pb. Tingginya kandungan Cu diduga karena ketersediaan Cu secara alami lebih tinggi dibandingkan Pb. Pada perhitungan BCF didapat hasil $BCF < 1$, hasil tersebut menunjukkan bahwa *Avicennia alba* di lokasi penelitian tersebut termasuk *excluder* terhadap kedua logam. Sedangkan hasil untuk perhitungan TF logam Pb menunjukkan $TF > 1$ yang menunjukkan bahwa *Avicennia alba* bersifat fitoekstraksi dan $TF < 1$ untuk logam Cu yaitu bersifat fitostabilisasi. Berdasarkan hasil tersebut, *Avicennia alba* mampu menyerap logam pada lingkungan sekitarnya serta mampu untuk mendegradasi logam dalam tubuhnya. Namun, tumbuhan ini mekanisme fitoremediasi yang berbeda seperti pada logam Pb dan Cu.

Penelitian yang dilakukan Supriyanti & Soenardjo (2015) pada air, sedimen, akar, dan buah mangrove *Avicennia marina* di perairan Tanjung Emas, Kota Semarang, Provinsi Jawa Tengah. Hasil penelitian menunjukkan kandungan logam Cu pada sedimen di semua stasiun hasilnya lebih tinggi sebesar 1,236 – 3,212 mg/kg dibandingkan Pb sebesar 0,251 – 0,507 mg/kg. Hasil kandungan logam pada air

menunjukkan kandungan Cu sebesar 0,004 – 0,140 mg/kg lebih tinggi dibandingkan dengan logam Pb sebesar 0,010 – 0,060 mg/kg. Pada akar didapatkan kandungan logam Cu 2,104 – 2,529 mg/kg dan logam Pb 0,251 – 0,507 mg/kg, sedangkan pada buah didapatkan kandungan logam Cu sebesar 1,640 – 4,336 mg/kg dan logam Pb sebesar 0,114 mg/kg. Tingginya kandungan logam Cu dibandingkan logam Pb diduga karena logam Cu cenderung lebih mudah terendapkan dalam sedimen dibandingkan logam Pb, logam Cu yang berikatan kuat dengan bahan organik sehingga menurunkan mobilitasnya di perairan. Selain itu, penelitian tersebut menggunakan mangrove *Avicennia marina* yang sangat ketat dalam proses penyerapan logam non esensial seperti Pb. Hal tersebut sesuai dengan nilai BCF akar tertinggi ditemukan pada logam Pb dan nilai TF buah tertinggi pada logam Cu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kemampuan mangrove *Avicennia marina* dalam mengakumulasi logam Pb dan Cu termasuk kategori rendah.

Penelitian Ariyanto et al. (2020) dilakukan pada perairan Pantai Timur Asahan, Kabupaten Asahan, Provinsi Sumatera Utara. Penelitian tersebut menganalisis logam Pb pada sedimen mangrove dan organ-organ mangrove *Rhizophora apiculata* seperti daun, buah, batang, kulit kayu, dan akar mangrove. Hasil penelitian menunjukkan hasil kandungan logam Pb pada untuk organ-organ mangrove yaitu, kandungan Pb tertinggi terdapat pada bagian daun dan buah yaitu 0,00035 mg/kg dibandingkan pada batang yaitu 0,00025 mg/kg. Kandungan Pb pada sedimen mangrove yaitu 9,06 mg/kg, sedangkan pada akar mangrove yaitu 0,77 mg/kg. Hal tersebut menunjukkan bahwa logam Pb terakumulasi pada sedimen. Tingginya kandungan logam Pb pada akar diduga karena pengaruh ukuran sedimen yang lebih halus yang menyebabkan akumulasi logam yang lebih tinggi. Konsentrasi logam yang lebih tinggi dalam jaringan mangrove dibandingkan pada sedimen menunjukkan bahwa spesies mangrove mampu untuk menjadi agen fitoremediasi. Sehingga, berdasarkan penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa *Rhizophora apiculata* tidak dapat menjadi agen fitoremediasi pada lokasi tersebut.

Penelitian Hossain et al. (2022) dilakukan di sepanjang Teluk Utara Pantai Bengal, yang terletak di pesisir timur India, Bangladesh. Sampel diambil pada dua stasiun, stasiun pertama terletak di industri Mongla dan stasiun kedua terletak di Karamjol. Penelitian tersebut menggunakan tiga jenis mangrove yaitu *Excoecaria agallocha*, *Avicennia officinalis* dan *Sonneratia apetala*. Bagian mangrove yang digunakan adalah daun dan akar serta sedimen. Penelitian ini menunjukkan konsentrasi Cu, Fe dan Zn ditemukan lebih tinggi di Mongla daripada daerah Karamjol, hal tersebut diduga karena Mongla menerima debit industri yang baru didirikan seperti kilang minyak, batu bara dan semen. Dari segi kandungan logam pada tumbuhan, konsentrasi rata-rata pada tumbuhan adalah dalam urutan *E. agallocha* > *A. officinalis* > *S. Apetala*. Namun, kandungan logam pada akar tanaman *A. officinalis*, *S. Apetala* dan *E. agallocha* berbeda. Tanaman *E. agallocha* memiliki kandungan logam jauh lebih banyak dibandingkan dua tanaman lainnya. Pada daun, logam maksimum ditemukan pada tanaman *E. agallocha*, diikuti oleh *S. apetala* dan *A. Officinalis*. Khususnya, konsentrasi Fe lebih tinggi pada akar *A. officinalis* dan *S. apetala* daripada *E. Agallocha*. Namun, untuk Mn polanya terbalik untuk spesies

yang dipelajari. Konsentrasi Cu dan Zn hampir serupa pada akar dan daun, tetapi untuk Sr konsentrasinya lebih tinggi pada daun daripada akar semua tanaman. Hasil ANOVA menunjukkan konsentrasi Fe dan Mn dalam sedimen dan di antara spesies mangrove bervariasi secara signifikan ($p < 0,05$). Namun, untuk logam lainnya konsentrasinya tidak bervariasi secara signifikan di antara tanaman ($p > 0,05$). Dengan pengecualian Mn, spesies tumbuhan *E. agallocha*, *A. officinalis* dan *S. apetala* memiliki nilai BCF kurang dari satu, menunjukkan kemampuan yang lemah untuk mengakumulasi logam. Berdasarkan nilai TF, semua tanaman menunjukkan nilai yang lebih besar dari satu untuk sebagian besar logam, menunjukkan bahwa tanaman ini dapat memindahkan logam dari akar ke daun dan dapat beroperasi sebagai fitoremediator di wilayah penelitian. Model BCF, TF dan regresi linier menunjukkan bahwa spesies *E. agallocha* memiliki potensi fitoekstraksi yang lebih kuat, sedangkan *A. officinalis* dapat digunakan sebagai fitoekstraktor logam di daerah ini.

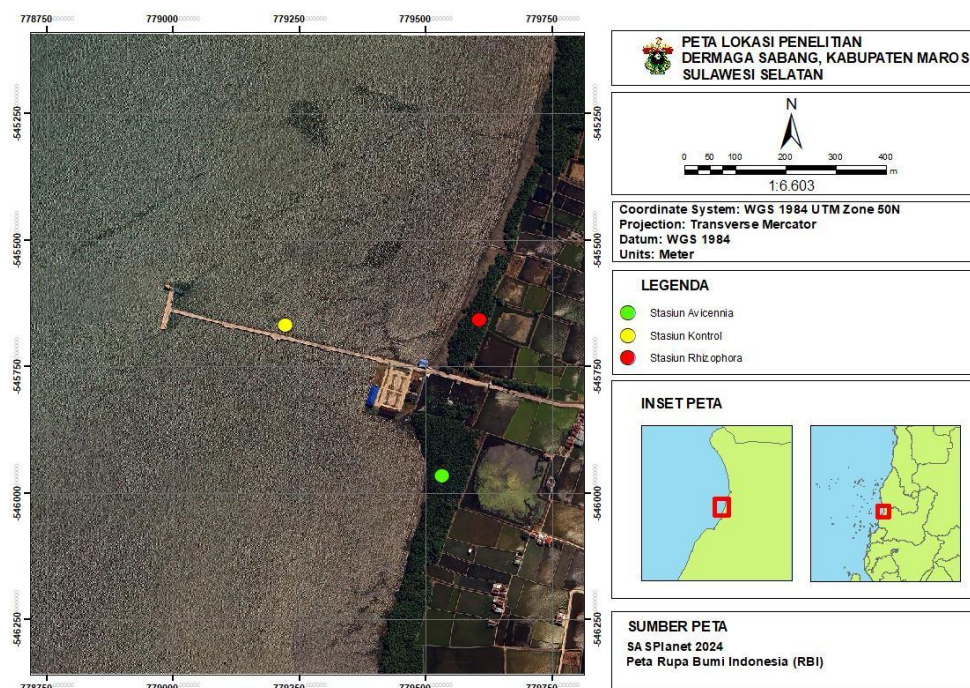
Penelitian Samosir et al. (2023) dilakukan di Perairan Karangsong, Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat. Hasil kandungan logam Cu dan Pb pada sedimen, akar dan daun mangrove *Rhizophora mucronata* didapatkan kandungan Cu dan Pb akar lebih besar dibandingkan pada daun, Cu pada akar dan daun yaitu 3,6 – 5,6 ppm dan 0,7 – 1,4 ppm. Sedangkan Pb pada akar dan daun didapatkan 0,7 – 0,8 ppm dan 0,2 – 0,4 ppm. Hal tersebut didukung oleh tingginya kandungan Cu dan Pb pada sedimen yaitu Cu sebesar 8,8 – 13,1 ppm dan Pb 0,6 – 0,9 ppm. Perhitungan nilai TF menunjukkan translokasi logam Pb lebih besar dibandingkan logam Cu. Rendahnya nilai TF pada logam Cu menunjukkan bahwa logam tersebut digunakan oleh tumbuhan untuk aktivitas metabolisme dan pertumbuhan. Pada perhitungan BCF kedua logam pada akar dan daun mangrove menunjukkan hasil $BCF < 100$. Faktor konsentrasi (BCF) tertinggi terdapat pada akar mangrove, yang membuktikan bahwa akar memiliki kemampuan lebih baik dalam mengakumulasi logam di sedimen dibandingkan dengan daun. Meskipun begitu, kemampuan akumulasi pada akar dan daun masih tergolong rendah.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan tempat

Penelitian berlangsung dari bulan November 2024 hingga Januari 2025, pengambilan sampel berlokasi di perairan Dermaga Sabang, Kecamatan Bontoa, Kabupaten Maros, Sulawesi Selatan. Analisis sampel dilakukan di Laboratorium Oseanografi Kimia dan Laboratorium Oseanografi Fisika dan Geomorfologi Pantai, Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, serta Laboratorium Kimia Pakan, Fakultas Peternakan, Universitas Hasanuddin, dan Balai Besar Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Hasil Perkebunan, Mineral Logam dan Maritim (BBIHPMM) Makassar. Lokasi pengambilan sampel ditampilkan seperti pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Peta lokasi penelitian. Sumber: SASplanet, ArcGIS

2.2 Alat dan bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Alat-alat yang digunakan

No.	Alat	Kegunaan
1.	Thermometer	Pengukur suhu perairan
2.	Alat tulis	Mencatat data
3.	<i>Cool box</i>	Menyimpan kantong sampel
4.	<i>Digital refractometer</i>	Pengukur salinitas air
5.	Kamera	Pengambil dokumentasi kegiatan
6.	Sedimen <i>Core</i>	Pengambil sampel sedimen
7.	Botol sampel	Wadah sampel air
8.	Gergaji	Pemotong akar mangrove
9.	Cawan porselin	Wadah pengabuan sedimen
10.	pH meter	Pengukur kadar pH air
11.	Gelas kimia	Wadah saat analisis
12.	Erlenmeyer	Wadah saat analisis
13.	<i>Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)</i>	Pengukur kandungan logam
14.	Tanur	Pengabuan sedimen
15.	Lumpang dan alu	Penghalus sampel sedimen
16.	Oven	Pengering sampel
17.	Nampan	Wadah saat analisis
18.	<i>Sieve net</i> dan <i>sieve shaker</i>	Pengayak sedimen
19.	Timbangan analitik	Penimbang sampel
20.	Pipet tetes	Pemindahkan larutan dengan volume kecil
21.	<i>Shaker</i>	Pengaduk magnetik
22.	<i>Hotplate</i>	Pemanas sampel
23.	ORP meter	Mengukur Eh sedimen
24.	<i>Digestion block</i>	Memanaskan larutan

Tabel 2. Bahan-bahan yang digunakan

No.	Bahan	Kegunaan
1.	Sampel sedimen	Sebagai bahan analisis
2.	Sampel air	Sebagai bahan analisis
3.	Sampel akar mangrove	Sebagai bahan analisis
4.	Plastik sampel	Wadah sampel
5.	Label	Pemberi penanda
6.	Spidol	Pemberi penanda
7.	Tissue	Pengering alat
8.	Aquades	Kalibrasi dan sterilisasi alat
9.	Larutan asam perklorat (HClO_4)	Pendestruksi logam
10.	Larutan asam nitrat (HNO_3)	Pelarut logam
11.	Kertas saring Whatman No. 42	Penyaring larutan
12.	Larutan natrium thiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)	Sebagai agen titrasi
13.	Larutan asam sulfat (H_2SO_4)	Pelarut endapan
14.	Larutan amilum	Sebagai indikator titik akhir titrasi
15.	Larutan Kalium iodida dan natrium hidroksida ($\text{KI} + \text{NaOH}$)	Pembebas iodium
16.	Larutan mangan sulfat (MnSO_4)	Pereaksi pengukuran oksigen terlarut

2.3 Metode penelitian

2.3.1 Tahap persiapan

Pada tahap persiapan, penulis melakukan konsultasi kepada pembimbing, melakukan studi literatur, mengumpulkan informasi terkait kondisi umum lokasi penelitian serta menentukan metode penelitian.

2.3.2 Tahap penentuan stasiun

Pada tahap ini, penulis bersama pembimbing menentukan stasiun berdasarkan kondisi perairan dan aktivitas antropogenik sekitar ekosistem mangrove yang mendapatkan input logam Pb dan Cu. Stasiun penelitian terbagi menjadi 3 titik stasiun yaitu, 2 stasiun pada hutan mangrove dan 1 stasiun pada lokasi yang jarang ataupun tidak ditumbuhi mangrove sebagai titik kontrol. Pada stasiun 1 dan 2 dilakukan pengambilan sampel sedimen, air dan akar mangrove. Sedangkan pada stasiun 3 dilakukan pengambilan sampel sedimen dan air. Setiap stasiun dilakukan pengukuran parameter dan pengambilan sampel sebanyak 3 kali pengulangan (Darmawati, 2023).

2.3.3 Pengambilan sampel

Pengambilan sampel air. Pengambilan sampel air dilakukan dengan modifikasi metode yang digunakan dalam penelitian Awaliyah (2018). Sampel air diambil dari kolom air menggunakan botol sampel dengan volume 1000 mL. Botol sampel dimasukkan ke dalam *cool box*. Sebelum proses ekstraksi, sampel disimpan dalam *cool box*.

Pengambilan sampel sedimen. Pengambilan sampel sedimen dilakukan dengan modifikasi metode yang digunakan dalam penelitian Darmawati (2023). Sampel sedimen yang diambil adalah lapisan permukaan sedimen. Sedimen diambil sebanyak ± 1000 gram menggunakan *sediment core* dengan diameter 5 cm dan panjang 20 cm untuk pengambilan sedimen hingga kedalaman 30 cm. Sampel sedimen yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam plastik sampel dan dimasukkan ke dalam *cool box*.

Pengambilan sampel akar mangrove *Rhizophora* sp. dan *Avicennia* sp. Pengambilan sampel akar dilakukan mengacu pada metode yang digunakan dalam penelitian Darmawati (2023). Akar yang diambil adalah akar yang tertanam di dalam sedimen dengan diameter akar sekitar 1 cm dan panjang sekitar 15-30 cm menggunakan gergaji (Sari et al., 2024). Sampel akar yang diambil yaitu akar *Rhizophora* sp. sebanyak 5 akar dan akar *Avicennia* sp. sebanyak 5 akar. Setelah pengambilan, akar dibersihkan dengan air, kemudian dimasukkan ke dalam plastik sampel dan *cool box*.

2.3.4 Pengukuran parameter oseanografi fisika-kimia

Suhu. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan *thermometer* pada tiap stasiun. Pengukuran suhu dilakukan saat pengambilan sampel air, dengan cara bagian batang *thermometer* dicelupkan ke dalam air laut lalu tunggu beberapa saat hingga

air raksa pada *thermometer* berhenti. Setelah itu, baca skala pada *thermometer* lalu catat hasil pengukuran. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan (Darmawati, 2023).

Derajat Keasaman (pH). Pengukuran pH dilakukan di laboratorium menggunakan pH meter. Sampel air laut dipindahkan ke dalam gelas kimia, lalu pH meter dikalibrasi menggunakan aquades. Setelah itu dicelupkan *probe* pH meter ke dalam sampel. Setelah itu catat hasil yang ditunjukkan (Rachmawati et al., 2018).

Salinitas. Pengukuran salinitas dilakukan dengan *digital refractometer*. Pengukuran ini dilakukan pada sampel air laut yang telah diambil menggunakan botol sampel lalu diuji di laboratorium. *Digital refractometer* dikalibrasi terlebih dahulu dengan cara ditetaskan aquades pada detektor dan dikeringkan menggunakan tissue. Setelah itu, sampel air laut diambil menggunakan pipet tetes lalu ditetaskan sebanyak 1-2 tetes pada detektor *digital refractometer* (Darmawati, 2023).

Oksigen terlarut (DO). Metode pengukuran oksigen terlarut perairan menggunakan metode pada penelitian Fajriani (2022). Perhitungan DO (*Dissolved Oxygen*) dilakukan secara *in situ*. Sampel air diambil menggunakan botol terang. Setelah itu ditambahkan 2 mL larutan mangan sulfat (MnSO_4) ke dalam sampel air dan dihomogenkan dengan baik. Selanjutnya, ditambahkan 2 mL larutan Kalium Iodida + Natrium Hidroksida ($\text{KI} + \text{NaOH}$) dan dihomogenkan kembali. Ditambahkan 2 mL larutan asam sulfat (H_2SO_4) ke dalam sampel air untuk melarutkan endapan dan dihomogenkan hingga endapan larut. Dilakukan titrasi dengan ditetaskan larutan Natrium Thiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) perlahan-lahan ke dalam sampel air hingga larutan berubah warna menjadi kuning kecoklatan, dicatat jumlah tetesan yang digunakan. Lalu ditetaskan larutan amilum (*starch soluble*) sebanyak 5 tetes, yang akan berubah menjadi warna ungu. Teruskan titrasi dengan ditetaskan larutan Natrium Thiosulfat secara perlahan hingga warna ungu hilang dan larutan menjadi bening. Catat jumlah tetesan yang digunakan untuk mencapai titik akhir. Setelah titrasi selesai, dilakukan perhitungan berdasarkan jumlah tetesan Natrium Thiosulfat yang digunakan untuk mendapatkan konsentrasi oksigen terlarut (DO) dalam sampel air.

Potensi Redoks (Eh). Potensi redoks (Eh) sedimen diukur menggunakan pH meter yang dilengkapi elektroda platina. Prosedur pengukuran potensial redoks pada sedimen dilakukan di laboratorium. Langkah pertama yaitu sampel dimasukkan ke dalam labu erlenmeyer. Eh diukur menggunakan Eh meter, dengan cara sensor elektroda dicelupkan ke dalam sedimen secara perlahan agar tidak merusak struktur sampel. Tunggu hingga meter menunjukkan nilai stabil. Setelah itu, sensor elektroda disterilkan dengan cara dibersihkan menggunakan aquades dan dikeringkan menggunakan tissue (Balai Penelitian Tanah, 2009).

Ukuran butir sedimen. Tahapan menganalisis ukuran butir sedimen yaitu pertama-tama sedimen dikeringkan terlebih dahulu menggunakan oven selama 2 x 24 jam pada suhu 150°C. Setelah sampel sedimen kering, selanjutnya sampel didinginkan lalu dihaluskan menggunakan lumpang dan alu. Setelah halus, sampel dibersihkan dari kotoran-kotoran dan pecahan-pecahan cangkang biota dari sedimen. Tahap selanjutnya, sampel ditimbang sebanyak 100 gram dan diayak menggunakan *sieve shaker* yang berisi *sieve net* yang telah tersusun mulai dari

ukuran 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, serta 0,063 mm dan <0,063 mm. Kemudian hasil ayakan sampel dipisahkan sesuai dengan ukurannya dan ditimbang sebagai hasil ayakan masing-masing ukuran (Hasanuddin, 2013).

Adapun rumus untuk menghitung persentase butir sedimen pada metode ayakan kering menggunakan rumus menurut Hutabarat & Evand (1985) di bawah ini.

$$\%Berat = \frac{Berat\ hasil\ ayakan}{Berat\ awal} \times 100$$

Setelah dilakukan perhitungan, selanjutnya dikelompokkan ukuran butir sedimen menurut diameternya yang kemudian dihitung logaritma phi (Φ) diameter butir sedimennya agar dapat diklasifikasikan menurut analisis ukuran sedimen menurut Wentworth. Skala Wentworth untuk mengklasifikasikan partikel disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Skala Wentworth

Kelas Ukuran Butir	Diameter (mm)
Kerikil besar (<i>boulders</i>)	>256
Kerikil kecil (<i>gravel</i>)	2 - 256
Pasir sangat kasar (<i>very coarse sand</i>)	1 – 2
Pasir kasar (<i>coarse sand</i>)	0,5 – 1
Pasir sedang (<i>medium sand</i>)	0,25 – 0,5
Pasir halus (<i>fine sand</i>)	0,125 – 0,25
Pasir sangat halus (<i>very fine sand</i>)	0,0625 – 0,125
Debu (<i>silt</i>)	0,002 – 0,0625
Lempung (<i>clay</i>)	0,0005 – 0,002
Material terlarut (<i>dissolved material</i>)	<0,0005

Sumber: Hutabarat & Evans (1985)

Bahan Organik Total (BOT). Analisis bahan organik total sedimen dilakukan menggunakan metode *Loss on ignition* (Heiri et al., 2001). Cawan porselin dioven selama 15 menit, setelah itu ditimbang berat cawan (Bc). Kemudian sampel sedimen ditimbang sebanyak 5 gram sebagai berat awal (Baw) dan dimasukkan ke dalam cawan. Setelah sampel ditimbang, sampel dimasukkan ke dalam tanur pada suhu 500°C selama 3,5 jam. Sampel yang telah ditanur kemudian didinginkan selama satu malam. Kemudian sampel dioven kembali selama 30 menit lalu ditimbang kembali sebagai berat akhir (Bak). Setelah pengukuran BOT selesai dilakukan, selanjutnya dilakukan perhitungan kandungan BOT. Adapun rumus-rumus yang digunakan yaitu:

a. Bahan organik

$$Berat\ BO\ awal = Berat\ cawan + Berat\ sampel$$

b. Kandungan bahan organik

$$Kandungan\ BO = \pm(Baw - Bc)(Bak - Bc)$$

c. Persentase kandungan bahan organik

$$\% \text{Bahan organik total} = \frac{A - B}{C} \times 100$$

Keterangan :

- Baw = berat awal (gram)
- Bak = berat akhir (gram)
- Bc = berat cawan (gram)
- A = berat cawan + berat sampel (gram)
- B = berat setelah ditanur (gram)
- C = berat sampel (gram)

2.4 Pengukuran logam Pb dan Cu pada sedimen, air, dan akar mangrove

2.4.1 Analisis kandungan logam pada sedimen

Metode yang digunakan dalam menganalisis logam di sedimen menggunakan metode destruksi basah (Kristianingrum, 2012). Preparasi dan analisis kandungan logam pada sampel sedimen dilakukan dengan modifikasi penelitian yang dilakukan oleh Awaliyah (2018). Prosedur preparasi dilakukan dengan mengeringkan sampel sedimen dalam oven pada suhu 105°C selama ± 3 jam. Setelah proses pengeringan, sampel sedimen dihaluskan. Sebanyak 2 gram sampel sedimen yang telah dikeringkan dalam oven dimasukkan ke dalam tabung *digestion block*. Untuk meminimalisir percikan dan mempercepat reaksi, sebanyak 0,5 mL aquades ditambahkan sebelum destruksi. Proses destruksi dilakukan dengan 10 mL asam nitrat (HNO_3) pada suhu 100°C selama dua jam. Setelah pendinginan selama 15 menit, 0,5 mL asam perchlorat (HClO_4) ditambahkan secara bertahap, diikuti pemanasan lanjutan selama satu jam. Larutan hasil destruksi kemudian diencerkan dengan 100 mL aquades dan disaring menggunakan kertas saring Whatman no. 42. Konsentrasi logam diukur menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

2.4.2 Analisis logam pada sampel air

Metode yang digunakan dalam menganalisis logam di air menggunakan metode destruksi basah (Kristianingrum, 2012). Prosedur preparasi dan analisis kandungan logam pada sampel air dilakukan berdasarkan modifikasi penelitian yang dilakukan oleh Lestaningrum (2013) & Awaliyah (2018). Preparasi sampel dimulai dengan menuangkan sampel air sebanyak 10 mL ke dalam tabung *digestion block* kemudian ditambahkan 0,5 mL aquades sebelum proses destruksi. Proses destruksi dilakukan dengan 10 mL HNO_3 pada suhu 100°C selama dua jam. Setelah pendinginan selama 15 menit, 0,5 mL HClO_4 ditambahkan secara bertahap, diikuti pemanasan lanjutan selama satu jam. Larutan hasil destruksi kemudian diencerkan dengan 100 mL aquades dan disaring menggunakan kertas saring Whatman no. 42. Konsentrasi logam diukur menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

2.4.3 Analisis logam pada sampel akar mangrove

Metode yang digunakan dalam menganalisis logam di akar mangrove menggunakan destruksi basah (Kristianingrum, 2012). Preparasi dan analisis kandungan logam pada sampel akar dilakukan dengan modifikasi penelitian yang dilakukan oleh Awaliyah (2018). Prosedur preparasi dilakukan dengan memotong kecil akar mangrove. Potongan akar tersebut kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama ± 3 jam. Setelah proses pengeringan, sampel akar dihaluskan. Sebanyak 2 gram sampel akar dimasukkan ke dalam tabung *digestion block*. Untuk meminimalisir percikan dan mempercepat reaksi, sebanyak 0,5 mL aquades ditambahkan sebelum destruksi. Proses destruksi dilakukan dengan 10 mL HNO₃ pada suhu 100°C selama dua jam. Setelah pendinginan selama 15 menit, 0,5 mL HClO₄ ditambahkan secara bertahap, diikuti pemanasan lanjutan selama satu jam. Larutan hasil destruksi kemudian diencerkan dengan 100 mL aquades dan disaring menggunakan kertas saring Whatman no. 42. Konsentrasi logam diukur menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS).

2.5 Analisis data

Penentuan kualitas air pada perairan dilakukan menggunakan baku mutu air laut dengan Standar Baku Mutu air laut untuk mangrove dan penentuan status pencemaran logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) untuk perairan, tertuang di dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup disajikan pada **Tabel 4** (Ishak et al., 2023). Penentuan status pencemaran logam Pb dan Cu di sedimen ditentukan menggunakan standar baku kualitas sedimen dari *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand* (ANZECC & ARMCANZ, 2000), sedangkan penentuan status pencemaran setiap logam di akar mangrove dengan menggunakan metode penentuan Allaway (1968) dalam Samosir et al. (2023). Standar baku mutu yang rinci disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 4. Standar baku mutu air laut untuk biota laut

Parameter	Baku mutu	Satuan
pH	7 – 8,5	-
Suhu	28-32	°C
Salinitas	s/d 34	‰
Oksigen terlarut (DO)	>5	ppm

Sumber: Peraturan Pemerintah Republik Indonesia nomor 22 tahun 2021

Tabel 5. Standar baku mutu logam Pb dan Cu

Jenis sampel	Jenis logam	Baku mutu	Sumber
Sedimen	Timbal (Pb)	50 mg/kg	ANZECC & ARMCANZ, 2000
	Tembaga (Cu)	65 mg/kg	
Air	Timbal (Pb)	0,008 ppm	PP RI No. 22 tahun 2021
	Tembaga (Cu)	0,008 ppm	

Jenis sampel	Jenis logam	Baku mutu	Sumber
Akar mangrove	Timbal (Pb)	0,1 – 10 ppm	Allaway (1968)
	Tembaga (Cu)	4 – 15 ppm	

Perhitungan *Biological Concentration Factor* (BCF) pada akar digunakan untuk mengetahui kandungan logam pada akar yang berasal dari lingkungan (Rachmawati et al., 2018). Perhitungan BCF akan dinilai menggunakan analisis yang ditetapkan oleh MacFarlane et al. (2007) *dalam* Rachmawati et al. (2018) dengan rumus sebagai berikut :

$$BCF = \frac{\text{Konsentrasi logam pada akar}}{\text{Konsentrasi logam pada sedimen}}$$

Penentuan kemampuan akar dalam mengakumulasi logam digunakan kriteria berdasarkan nilai BCF yang diperoleh, seperti pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Kemampuan akar dalam akumulasi logam

No.	Nilai BCF	Level kemampuan
1	BCF >1	Akumulator
2	BCF =1	Indikator
3	BCF <1	Excluder

Sumber: Baker (1981) *dalam* Rachmawati et al. (2018)

Nilai kandungan logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada sedimen dan air di uji menggunakan uji Kruskal-Wallis dan *One-Way* ANOVA. Apabila hasil uji menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$) maka akan dilakukan uji lanjutan yaitu uji Beda Nyata Terkecil (BNT) untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan (Darmawati, 2023). Sedangkan, nilai kandungan logam Pb dan Cu pada akar mangrove *Avicennia* sp. dan *Rhizophora* sp. diuji menggunakan Uji T *independent*, apabila hasil uji didapatkan $p < 0,05$ menunjukkan terdapat perbedaan signifikan, jika $p > 0,05$ maka tidak terdapat perbedaan signifikan (Sari & Purnomo, 2024). Menurut Hamuna (2018), parameter fisik-kimia perairan memiliki pengaruh terhadap konsentrasi logam di lingkungan. Metode Analisis Komponen Utama atau *Principal Component Analysis* (PCA) dilakukan untuk melihat hubungan atau keterkaitan antara parameter fisik-kimia perairan terhadap konsentrasi logam Pb dan Cu di lingkungan (Suryo et al., 2021).