

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Aktivitas manusia yang mengakibatkan terjadinya pencemaran laut yang dimana masuk atau dimasukkannya suatu hal, makhluk hidup, zat, energi dan lain-lain ke dalam perairan laut sehingga tidak terdapat kesesuaian dengan standar baku mutu dan fungsi dari laut, akan dapat berdampak besar (Tri, 2018). Bahan yang masuk selanjutnya terakumulasi dan tidak dapat terdegradasi kembali, salah satunya adalah logam yang dapat membahayakan lingkungan laut (Polapa et al., 2022) terlebih ekosistem terumbu karang. Logam seperti Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) dapat dengan mudah terakumulasi di perairan laut yang berasal dari pertambangan, limbah industri dan transportasi laut (Hafandy et al., 2016) dapat menjadikannya sebagai polutan utama pencemar laut.

Peningkatan pencemaran logam di Kota Makassar diduga terkait dengan pertumbuhan ekonomi daerah ini, yang salah satunya ditopang oleh sektor industri dengan nilai mencapai lebih dari tiga triliun rupiah. Sumber pencemaran logam tersebut kemungkinan berasal dari dua sungai besar, yaitu Sungai Jeneberang dan Sungai Tallo, yang keduanya bermuara di perairan Kota Makassar (Yafendi et al., 2024 & Fitriani et al., 2021). Menjadi salah satu wilayah dengan tingkat perindustrian, wisata dan transportasi laut yang tinggi di Kota Makassar, Kepulauan Spermonde yang di dalamnya termasuk Pulau Samalona, Barrang Lompo, Lae-lae, Gusung Tallang dan Bonebatang terindikasi telah mengalami pencemaran logam seperti logam timbal dan tembaga. Logam Pb ditemukan pada porifera (11,22–11,99 mg/Kg) dan sedimen (13,74 mg/Kg) di Pulau Samalona (Melawaty & Paborong, 2018). Di Pulau Lae-lae, Samalona, dan Barrang Lompo, Pb terdeteksi pada *Padina australis* (0,04–0,13 mg/Kg) (Supardi & Nugroho, 2020), serta pada karang di Barrang Lompo yaitu *Platygyra* sp. (2,49 mg/Kg) dan *Goniastrea* sp. (3,78 mg/Kg) (Pratikto, 2014). Sementara itu, logam Cu terakumulasi di perairan Samalona sebesar $0,0055 \pm 0,001$ hingga $0,112 \pm 0,035$ mg/L (Polapa et al., 2020).

Jarak Kepulauan Spermonde yang dekat dan dengan daratan utama dengan tingkat perindustrian dan transportasi laut seperti Pelabuhan Paotere, Pelabuhan Soekarno-Hatta dan Pelabuhan Pertamina, dapat menyebabkan terakumulasinya logam di perairan, sedimen, maupun biota seperti karang yang ada. Tumpahan minyak (Melawaty & Paborong, 2018), buangan industri, pertambangan, galangan kapal dan aktivitas tinggi pelabuhan (Pratikto, 2014) menjadi penyebab dari semakin tingginya kandungan logam di perairan. Sehubungan dengan itu Parenden (2024)



a pertumbuhan karang yang terdapat di Pulau Gusung Tallang agian dari Kepulauan Spermonde di Kota Makassar dapat saja pencemaran logam yang terindikasi dari penurunan tutupan karang ing. Namun, belum terdapat data terkait pencemaran logam pada Pulau Gusung Tallang Makassar.

Logam berat dapat terakumulasi di dasar perairan dan diserap oleh organisme, baik dari sedimen maupun kolom air. Karang, sebagai organisme sesil, mampu menyerap dan mengendapkan logam dalam jaringan dan rangkanya sebagai bentuk detoksifikasi dari polip tetapi berdampak negatif pada proses kalsifikasi rangka karang, termasuk pada *zooxanthellae* simbiotiknya (Riska et al., 2022 & Vera et al., 2018). Kemampuannya ini menjadikan karang sebagai bioindikator pencemaran logam karena sifat menetap dan struktur tubuhnya yang mendukung analisis logam (Armid, 2022 & Riska et al., 2022). Khususnya *Acropora* bercabang, memiliki luas permukaan besar yang meningkatkan penyerapan logam melalui difusi dan absorpsi (Faiz et al., 2013 & Riska et al., 2022).

Oleh karena hasil penelitian sebelumnya menunjukkan kontaminasi logam Pb dan Cu pada perairan Kepulauan Spermonde, akan tetapi belum ada informasi yang terkait kandungan logam Pb dan Cu pada air, sedimen dan karang *Acropora* di Pulau Gusung Tallang, penelitian “Analisis kandungan logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada karang bercabang *Acropora* sp. di perairan Pulau Gusung Tallang Kota Makassar” perlu untuk dilakukan.

1.2. Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk:

- Mengetahui kandungan logam Pb dan Cu yang terakumulasi pada air, sedimen dan karang bercabang *Acropora* sp. di perairan Pulau Gusung Tallang, Kota Makassar;
- Mengevaluasi faktor bioakumulasi logam Pb dan Cu pada karang bercabang *Acropora* sp. di perairan Pulau Gusung Tallang, Kota Makassar;
- Mengetahui jumlah kepadatan (densitas) *zooxanthellae* pada karang bercabang *Acropora* sp. dan hubungannya dengan akumulasi logam Pb dan Cu pada air dan polip karang di perairan Pulau Gusung Tallang, Kota Makassar; dan
- Menganalisis keterkaitan faktor lingkungan dengan akumulasi logam Pb dan Cu pada air, sedimen dan karang bercabang *Acropora* sp. di Pulau Gusung Tallang, Kota Makassar.

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi menyeluruh mengenai tingkat pencemaran logam berat Pb dan Cu di wilayah perairan Pulau Gusung Tallang, Kota Makassar melalui analisis kandungan logam pada air, sedimen dan karang bercabang *Acropora* sp. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi faktor bioakumulasi sebagai indikator potensi akumulasi logam pada karang dan mengungkap dampak akumulasi logam Pb dan Cu pada air dan polip karang karang melalui pengukuran densitas *zooxanthellae*. Lebih lanjut, t membantu memahami hubungan antara parameter kualitas tingkat akumulasi logam berat, sehingga dapat menjadi dasar pengelolaan lingkungan pesisir dan mitigasi pencemaran secara pengembangan dan pengelolaan kawasan kepada pemerintah, dan penunjang.



1.3. Landasan Teori

1.3.1. Pencemaran Laut

Pencemaran laut adalah masuknya bahan atau energi ke lingkungan laut, baik langsung maupun tidak langsung, yang merusak ekosistem, sumber daya hayati, serta membahayakan biota dan kesehatan manusia (Nugroho, 2021). Pencemaran ini merupakan bentuk *environmental impairment* yang disebabkan oleh limbah industri, pertambangan, pelabuhan, tumpahan minyak, dan limbah rumah tangga (Sarianto et al., 2016., Ali, 2017., & Setiawan, 2014). Limbah tersebut sulit terurai dan mencemari laut, termasuk pencemaran logam berat. Sumber pencemaran bisa berasal dari laut (*marine based*) maupun dari darat (*land based*), seperti limbah cair dari pengeboran lepas pantai dan aliran limbah dari sungai perkotaan (Pahlewi, 2023).

1.3.2. Pencemaran Logam

Pencemaran logam berdampak serius pada lingkungan dan organisme perairan. Logam sebagai limbah dapat mencemari perairan melalui pelapukan, erosi, limpasan air hujan, limbah industri, pertambangan, hingga aktivitas pertanian. Logam berbahaya karena bersifat *non-degradable* dan cenderung mengendap di dasar perairan (Satriani, 2022). Dampaknya tergantung kadar dan jumlah logam yang masuk, yang bisa mengubah sifat fisik air seperti rasa, warna, bau, dan viskositas (Bubala et al., 2019). Bila melebihi ambang batas, logam berat menjadi racun bagi organisme dan dapat terakumulasi dalam tubuh ikan, udang, kerang, serta biota laut lainnya (Wicaksono et al., 2013).

1.3.3. Logam

Logam tergolong senyawa beracun yang berbahaya bila terakumulasi di perairan melebihi ambang batas karena bersifat stabil dan sulit terurai, sehingga dapat masuk ke tubuh biota dan menyebabkan kematian (Hasbulan, 2022). Contoh logam yang mencemari perairan adalah Hg, Ni, Cr, Cu, Cd, dan Pb, yang memiliki tingkat toksisitas tinggi, sedang, hingga rendah. Pb dan Cu tergolong logam dengan toksisitas tinggi (Amalia, 2021).

Pencemaran logam di laut rentan terjadi akibat aliran sungai yang membawa limbah industri seperti dari pabrik percetakan, baterai, cat, kabel, dan aktivitas nelayan yang menggunakan logam sebagai bahan bakar kapal. Selain itu, proses alamiah seperti erosi dan aktivitas antropogenik seperti penggunaan pestisida juga menyumbang pencemaran logam (Fernandes et al., 2023). Logam yang mengendap



ulit terurai dan terakumulasi dalam biota melalui biokonsentrasi, biomagnifikasi, serta bertahan di rantai makanan (Renni, 2023).

)

umbum adalah logam berat golongan IV-A dengan nomor atom 207,2. Logam ini bersifat lunak, memiliki titik lebur rendah, tahan

korosi, dan bukan penghantar listrik yang baik (Nurhamiddin & Ibrahim, 2018). Karena sifatnya, Pb sering digunakan untuk melapisi logam, membuat logam campuran, serta digunakan dalam industri baterai, kabel, cat, penyepuhan, pestisida, dan sebagai zat anti-letup pada bensin (Setyaningrum et al., 2018). Pb dapat masuk ke perairan secara alami melalui pengkristalan di udara dan hujan, atau secara antropogenik melalui limbah industri yang mengendap sebagai sedimen. Sedimen ini mencemari biota air seperti ikan, udang, dan kerang (Rumoey et al., 2022). Meski tidak selalu mematikan, paparan Pb pada konsentrasi rendah dapat menyebabkan efek subletal seperti gangguan pertumbuhan, reproduksi, morfologi, atau perilaku organisme (Panuntun et al., 2012). Pb juga diserap oleh karang dan terakumulasi dalam rangkanya saat proses kalsifikasi, namun dampak negatif akan menjadikannya rapuh dan mudah rusak (Pratikto, 2014). Timbal dalam tubuh karang dapat menghambat pertumbuhan, reproduksi, menurunkan laju kalsifikasi, serta mengganggu simbiosis dengan *zooxanthellae* (Riska et al., 2022).

b. Tembaga (Cu)

Tembaga atau *Cuprum* (Cu), logam ini disimbolkan dengan Cu yang terklasifikasi sebagai kelompok logam di dalam golongan I-B dengan nomor atom 29 dan berat atom 63,546. Logam Cu merupakan logam penghantar listrik terbaik setelah perak yang banyak digunakan dalam bidang elektronik dan listrik, serta digunakan dalam industri cat, insektisida dan fungisida (Nuhamiddin & Ibrahim, 2018). Logam Cu merupakan elemen mikro yang sangat dibutuhkan oleh organisme namun dalam jumlah yang sedikit. Logam Cu dapat berasal dari daerah industri dan akan diserap oleh biota perairan secara berkelanjutan apabila keberadaannya tetap dan selalu tersedia (Setyaningrum et al., 2018). Logam Cu banyak digunakan sebagai material penghantar listrik atau kawat listrik serta memiliki daya tahan akan korosi yang baik di dalam air yang disebabkan oleh lapisan oksida yang melapisi permukaannya. Pengikisan batuan mineral dan debu yang mengandung partikulat tembaga di udara merupakan sumber alami tembaga. Selain itu, industri, galangan kapal dan rumah tangga juga penggunaan cat *anti-fouling* pada kapal dan penggunaan pestisida dan fungisida pun menggunakan tembaga (Amalia, 2021). Logam Cu merupakan logam yang dalam keberadaan seimbang dapat berfungsi sebagai kofaktor dalam berbagai enzim yang diperlukan untuk metabolisme organisme laut dalam hal ini termasuk peran dalam fotosintesis dan respirasi seluler, di mana Cu terlibat dalam transpor elektron. Selain itu, tembaga diperlukan oleh karang untuk pertumbuhan dan perkembangannya, Cu dapat mendukung pembentukan struktur kalsium karbonat yang esensial bagi pembangunan rangka karang (Rahman, 2005).



Optimized using
trial version
www.balesio.com

organisme laut yang hidup di dasar perairan dan dibentuk oleh biota (CaCO₃). Terumbu pada karang berfungsi sebagai pelindung pantai dan terbagi menjadi tiga tipe: *barrier reef* (penghalang), *fringing reef* (tepi). Terumbu sendiri merujuk pada endapan kalsium karbonat yang terdiri dari karang, alga, dan organisme lain (Parenden, 2024).

Genus *Acropora* dari keluarga Acroporidae mencakup sekitar 120–140 spesies (Suharsono, 2008; H, 2021). Pertumbuhannya ditandai dengan percabangan yang dibentuk oleh polip aksial dan radial, menyerupai pola percabangan pada tumbuhan (Hopley et al., 2011). *Acropora* adalah genus dominan di karang dangkal dan dikenal sebagai pembangun utama terumbu karena keanekaragamannya yang tinggi (Wallace & Ronsen, 2006; H, 2021).

Berdasarkan H (2021), klasifikasi karang *Acropora* sp. (**Gambar 1**) didasarkan pada:

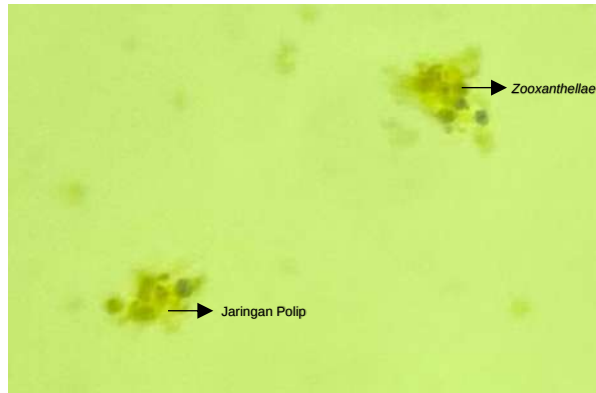


Gambar 1. Karang *Acropora* sp. bercabang
(Sumber: Nurma et al., 2022)

Kerajaan: Animalia
Filum: Cnidaria
Kelas: Anthozoa
Orde: Scleractinia
Keluarga: Acroporidae
Genera: *Acroporidae*
Spesies: *Acropora* sp.

Acropora sp. dengan bentuk pertumbuhan bercabang (*branching*) menyerupai pohon atau tanduk rusa, memiliki *axial corallite* yang jelas pada setiap cabangnya, dengan minimal dua subcabang per percabangan (Nurma et al., 2022). Karang terbentuk dari jutaan hewan kecil bernama polip, yang hidup berkoloni dan bersimbiosis dengan alga *zooxanthellae* (Runtuwene et al., 2020). Polip berbentuk seperti kantung berserat dengan tentakel mengelilingi mulut, menyerupai anemon kecil (Reskiwati et al., 2018). *Zooxanthellae* adalah mikroalga dari genus *Symbiodinium* yang hidup dalam sel gastrodermis karang dan berwarna kekuningan hingga kecoklatan (**Gambar 2**). Kehadiran *zooxanthellae* membatasi pertumbuhan karang hanya membutuhkan perairan jernih dan dangkal (<25 meter) untuk pertumbuhan (Munro et al., 2012).





Gambar 2. *Zooxanthellae* Karang
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Karang dapat memperoleh makanan dari partikel organik yang tersuspensi dalam sedimen yang mengendap di sekitar atau pada permukaan polip. Penyerapan ini dilakukan dengan menyaring makanan yang ada, namun, pengendapan sedimen yang berlebihan pada mulut polip dapat menghambat proses makan, sehingga terumbu karang memproduksi lendir (*mucus*) untuk membersihkan sedimen atau partikel yang menempel (Kolibongso et al., 2024). Selain itu, polip karang membantu karang mendapatkan makanan melalui tentakel yang mengelilingi mulutnya untuk menangkap plankton dan partikel organik yang terbawa arus laut. Polip tersebut menyaring plankton sebagai sumber nutrisi heterotrofik (Alimuddin et al., 2021). Sebagai alga uniseluler yang hidup bersimbiosis di dalam jaringan polip karang, melalui proses fotosintesis, *zooxanthellae* menghasilkan oksigen dan bahan organik (karbon organik) yang menyuplai hingga 90–95% kebutuhan energi karang. Dengan demikian, *zooxanthellae* menyediakan nutrisi autotrofik yang sangat penting bagi kelangsungan hidup karang, terutama di perairan tropis yang miskin nutrisi (Zurba, 2019).

1.4. Studi Literatur

1.4.1. Akumulasi Logam pada Karang

Sebagai organisme indikator, karang sangat berguna dalam memonitoring lingkungan dengan kerangka kapur yang dapat mengasimilasi logam yang telah terakumulasi selama bertahun-tahun, hal ini menjadikan efek negatif bagi karang (Shabib et al., 2021; Riska et al., 2022). Akumulasi logam pada karang dapat mengganggu proses secara fisiologis yang tinggi (Chan et al., 2014; Riska et al., 2022). Akumulasi logam pada karang dapat mengganggu kelangsungan hidup larva karang dan mengakibatkan perubahan komposisi dan jumlah *zooxanthellae* karang (El-Moselhy et al., 2014; Riska et al., 2022). Karang dapat terkontaminasi pada rangka karang dengan beberapa substitusi unsur kalsium oleh logam-logam tertentu dan serpihan logam yang mengandung logam berat masuk ke ruang pori kerangka karang. Sebagai organisme sesil, karang cukup memadai sebagai *trace metal* karena



rangka karang mampu mengasimilasi logam-logam yang lebih dari ratusan tahun tersimpan. Selain itu, melalui sumber makanannya, plankton dapat menjadi sumber logam bagi karang, yang dimana plankton akan menyerap logam yang ada di perairan, logam masuk secara difusi ke dalam plankton dan menuju ke polip karang (Armid, 2022). Karang mampu mengakumulasi logam dengan adsorpsi yang dimana karang akan mengakumulasi ion logam dari larutan, dengan permukaan sel yang bermuatan negatif, karang dapat berinteraksi dengan ion logam bermuatan positif yang melibatkan gugus fungsi seperti amina ($-NH_2$) dan hidroksil ($-OH$) yang dapat berperan dalam meningkatkan ion logam. Interaksi antara gugusan fungsi pada karang terhadap logam seperti Pb (II) berpasangan dengan elektron bebas atom oksigen pada gugus hidroksil atau gugus amina. Biomassa ini biasanya berbentuk bahan anorganik yang terdapat di dalam karang yang memungkinkan adanya reaksi pertukaran ion dengan logam (Marlina, 2012).

1.4.2. Faktor yang Mempengaruhi Akumulasi Logam pada Karang

Akumulasi logam khususnya Logam Pb dan Cu pada karang dan perairan laut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor baik itu aspek fisika, kimia, dan biologis lingkungan, serta karakteristik sedimen, kualitas perairan dan sumber pencemaran.

Suhu. Suhu dapat menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi akumulasi logam pada karang. Suhu perairan yang mengalami peningkatan (kenaikan suhu) dapat meningkatkan kelarutan logam sehingga logam dapat lebih mudah larut di dalam air apabila telah mencapai titik didih yang pas. Hal ini meningkatkan toksisitas logam berat di perairan karena metabolisme organisme meningkat sehingga penyerapan logam menjadi lebih intensif (Kusumadiani et al., 2024., Sukoasih et al., 2016., dan Nurfadilah et al., 2024). Metabolisme karang sangat dipengaruhi oleh suhu perairan, kenaikan suhu air laut dapat menyebabkan stres pada karang yang berdampak pada kemampuan karang dalam mengambil pakan (Aksari et al., 2020), dan akan memicu pemutihan karang (*coral bleaching*) karena keluarnya *zooxanthellae* dari jaringan karang yang dapat menurunkan kemampuan fotosintesis dan metabolisme karang (HS., 2024), yang dimana apabila densitas *zooxanthellae* berkurang maka, logam akan didepositkan pada kerangka karang sebagai upaya detoksifikasi oleh karang (Riska et al., 2022).

Salinitas. Peningkatan salinitas perairan akan mengakibatkan akumulasi logam berat di fase terlarut cenderung menurun karena logam lebih mudah mengendap atau membentuk kompleks dengan ion-ion dalam air laut, sehingga kelarutan dan bioavailabilitas logam akan berkurang (Fendjalang et al., 2022 dan Fadel, 2018). Apabila pada salinitas rendah, kelarutan logam akan meningkat sehingga akumulasi logam pada organisme air akan meningkat, hal ini mengakibatkan berkurangnya kompleks ionik dan pengendapan logam pada salinitas rendah, sehingga lebih banyak tersedia dalam bentuk ion bebas yang lebih mudah diserap oleh organisme. Perubahan salinitas dapat mempengaruhi *zooxanthellae* yang ada pada karang. Produktivitas dalam fotosintesis *zooxanthellae* ini akan memicu *bleaching* (Nugroho et al. 2023).



Derajat Keasaman (pH). pH berperan penting dalam menentukan kelarutan dan bentuk kimia dari logam berat. Apabila perairan basa, kelarutan logam berat menurun karena logam cenderung membentuk senyawa hidroksida atau karbonat yang tidak terlarut dan mengendap ke dalam sedimen, dan apabila perairan asam, kelarutan logam meningkat sehingga logam lebih banyak berada dalam bentuk ion bebas yang mudah terakumulasi dan bersifat toksik bagi organisme (Dewi et al., 2020 dan Amalia, 2021). Derajat keasaman (pH) berpengaruh terhadap metabolisme karang dimana pembentukan kerangka kalsium karang dan fotosintesis *zooxanthellae* karang. Pengasaman laut (*ocean acidification*) akan berpengaruh terhadap produktivitas metabolisme karang yang akan membuat karang stres dan mengganggu kemampuan produksi senyawa organik *zooxanthellae* yang memicu pada pemutihan karang dan penurunan laju pertumbuhan karang (Nayyiroh et al., 2022).

Arus. Arus di perairan laut berperan penting dalam distribusi dan penyebaran logam di perairan. Kecepatan arus yang tinggi cenderung mengurangi akumulasi logam di sedimen karena partikel tersuspensi dan logam berat lebih banyak terbawa dan tersebar sehingga pengendapan logam di perairan akan menjadi lebih kecil (Ma'rifah et al., 2016). Sebaliknya, arus yang lambat atau tenang memungkinkan logam berat mengendap dan terakumulasi lebih banyak di sedimen karena partikel yang mengikat logam tidak terbawa jauh (Nurfadilah et al., 2024). Arus dapat mempengaruhi kondisi fisiologis pertumbuhan terumbu karang, dimana arus memainkan peran dalam transport nutrisi, oksigen, larva dan sedimen di perairan yang dibutuhkan oleh karang dalam metabolisme dan regenerasi jaringan. Selain itu, arus dapat mempengaruhi bentuk fisik dan bentuk pertumbuhan terumbu karang (Ekayogiharso et al., 2014).

Kecerahan. Kecerahan berkaitan dengan konsentrasi padatan tersuspensi yang ada di perairan. Kecerahan yang tinggi biasanya menunjukkan rendahnya TSS, sementara kecerahan rendah menandakan banyaknya partikel tersuspensi di dalam air. Partikel tersuspensi ini dapat mengabsorpsi logam berat terlarut, sehingga logam berat akan melekat pada partikel dan kemudian mengendap ke dasar perairan. Kecerahan juga mempengaruhi aktivitas fotosintesis *zooxanthellae* yang bersimbiosis dengan karang. Kecerahan yang optimal mendukung fotosintesis sehingga meningkatkan metabolisme karang dan kemampuan mereka dalam mengelola akumulasi logam. Sebaliknya, kecerahan rendah akibat tingginya sedimen tersuspensi dapat menurunkan fotosintesis *zooxanthellae*, mengurangi densitasnya, dan melemahkan mekanisme detoksifikasi logam dalam karang. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan akumulasi logam berat berbahaya dalam jaringan karang dan kerangkanya (Riska et al., 2022).



ded Solid (TSS). Sebagai ukuran jumlah partikel padat yang air, TSS berpengaruh pada distribusi dan akumulasi logam. TSS berkaitan dengan partikel tersuspensi (adsorpsi) sehingga meningkatkan potensi peningkatan dan pengendapan logam ke dasar perairan, kurangnya cahaya yang masuk dapat menghambat

fotosintesis *zooxanthellae* yang bersimbiosis dengan karang, hal ini dapat melemahkannya dalam proses detoksifikasi logam yang terakumulasi ke dalamnya (Rizka et al., 2020).

Dissolved Oxygen (DO). Oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) yang menurun di perairan dapat meningkatkan daya toksik pada akumulasi logam yang ada. Kondisi DO yang rendah terjadi akibat penguraian bahan organik yang mengkonsumsi oksigen sehingga dapat memperburuk kualitas air dan meningkatkan stress pada organisme air yang dapat meningkatkan laju respirasi sehingga dapat menyerap logam dari lingkungan lebih banyak, mempercepat bioakumulasi logam dalam tubuhnya (Pradona & Partaya, 2022 dan Barus et al., 2024). Proses respirasi karang memerlukan kadar oksigen yang terkandung di perairan, fisiologis karang dipengaruhi oleh kandungan oksigen terlarut untuk mendukung proses metabolisme karang, respirasi dan pertumbuhan jaringan. Produksi energi yang diperlukan karang mempengaruhi mekanisme bertahan hidup karang dan kaitannya terhadap DO (Moir et al. 2020 dan Andaris et al., 2015).

Bahan Organik Total (BOT) pada Sedimen. Kandungan bahan organik total (BOT) pada sedimen berperan penting dalam peningkatan logam, kandungan bahan organik yang tinggi dapat meningkatkan kapasitas sedimen untuk mengabsorpsi dan mengakumulasi logam, sehingga konsentrasi logam di sedimen semakin tinggi (Najamuddin et al., 2020). Akumulasi logam berat di sedimen meningkat seiring dengan peningkatan BOT, karena senyawa organik menyediakan situs peningkatan logam yang kuat, membantu kompleks organik logam yang stabil, hal ini menyebabkan logam lebih banyak tersimpan di sedimen yang menjadi reservoir utama logam di ekosistem perairan (Ilham, 2023). Pertumbuhan dan keanekaragaman karang dapat dipengaruhi oleh degradasi jaringan karang yang disebabkan oleh bahan organik yang diuraikan oleh mikroorganisme yang mengurangi kualitas air dan berakhir pada tekanan yang berdampak pada karang yang kesehatannya berkurang (Nugroho et al., 2018).

Ukuran butir sedimen. Sedimen dengan ukuran butir yang lebih halus memiliki luas permukaan yang besar dan kandungan bahan organik yang lebih tinggi, sehingga dapat meningkatkan logam secara lebih efektif yang dibandingkan dengan sedimen berukuran kasar (Maslukah, 2013). Akumulasi logam berat pada karang terjadi melalui sedimentasi partikel halus yang mengandung logam berat yang dapat menempel pada substrat karang dan mempengaruhi kesehatan ekosistem karang. Sedimen halus yang mengandung logam berat dapat menimbulkan stres toksik bagi organisme karang dan biota laut lainnya, sehingga pemantauan ukuran butir sedimen dan kandungan logam berat sangat penting dalam konservasi terumbu karang.

Potensial redoks (eH) pada sedimen. Potensial redoks pada sedimen mempengaruhi proses oksidasi-reduksi di sedimen yang dapat mempengaruhi bentuk logam berat di lingkungan. Pada kondisi redoks rendah, logam berat dapat tereduksi dan dimobilisasi kembali ke air, sehingga logam berat tersedia dalam kolom air dan potensi toksisitas tinggi. Sebaliknya apabila kondisi redoks tinggi, maka logam berat lebih



stabil dan terikat dalam sedimen dan cenderung mengendap sehingga mengurangi mobilitas logam (Najamuddin et al., 2020).

Densitas *Zooxanthellae*. Akumulasi logam pada karang disalurkan ke *zooxanthellae* karang hampir 90% dari konsentrasi logam yang ada. Apabila densitas *zooxanthellae* tinggi, maka akumulasi logam di *zooxanthellae* akan meningkat dan mengurangi transfer ke polip dan kerangka, sebaliknya apabila densitas *zooxanthellae* rendah dapat menyebabkan akumulasi logam di polip atau kerangka meningkat dan akan menyebabkan kerusakan jaringan (Riska et al., 2022 dan Wicaksono et al., 2013).

1.5. Studi Kasus

Penelitian terkait akumulasi logam pada karang telah dilakukan di berbagai perairan. Beberapa penelitian tersebut di antaranya sebagai berikut.

Penelitian Riska et al. (2022) yang dilakukan di perairan Pomala, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara pada bulan juni-agustus, 2021. Penelitian ini dilakukan dengan 4 titik pengamatan yang diperkirakan menerima dampak kegiatan perindustrian nikel yang berada di pesisir Pomala. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *purposive sampling* dengan analisis logam pada sampel menggunakan AAS. Hasil yang didapatkan rata-rata konsentrasi logam berat Pb pada perairan stasiun 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut dalam mg/L adalah 0.012; 0.009; 0.011; dan 0.006. Berdasarkan hasil yang didapatkan, konsentrasi logam Pb yang ada telah melebihi ambang batas baku mutu air untuk biota laut berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.51 Tahun 2004. Hal ini mengindikasikan adanya tingkat aktivitas buangan limbah yang tinggi dan semakin kritisnya wilayah perairan Pomalaa. Berdasarkan hasil penelitian, logam Pb pada karang memiliki pada stasiun 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut dalam mg/L adalah 28,40; 18,70; 19,30; dan 1,20. Kandungan logam Pb pada karang berasal dari limbah domestik dan limbah yang terkonsentrasi dengan industri di pesisir Pomala seperti unit pembangkit listrik berupa air pendingin dan mesin, dan oli bekas.

Penelitian Armid (2021) dilakukan di muara Sungai Kuni-kuni; Teluk Staring, Kecamatan Maramo Utara dan Teluk Staring, Kecamatan Maramo. Penelitian menggunakan sampel *Acropora millepora* yang kemudian dianalisis kandungan logam yang ada di rangka, *tissue* dan *zooxanthellae* -nya, selanjutnya analisis kandungan logam dilakukan dengan metode AAS. Analisis statik dilakukan menggunakan BCF (Faktor Biokonsentrasi). Hasil yang didapatkan adalah kandungan logam Pb yang terinkorporasi pada skeleton, *tissue* dan *zooxanthellae* berturut-turut sebesar 6,41 ppm; 14,62 ppm; dan 5,88 ppm yang selanjutnya logam yang dianalisis, bagian *tissue* mengakumulasi ketiga logam lingkungan dua bagian lainnya. Akumulasi logam dilakukan melalui e yang cenderung untuk membawa logam masuk ke dalam ang dengan istilah *species dependent effect*. Melalui faktor , merupakan akumulasi logam secara langsung dari air oleh biota , pada bagian tissue sebesar 56.030 dengan nilai BCF > 1 yang



menandakan organisme memiliki kemampuan untuk mengakumulasi logam di dalam tubuhnya.

Penelitian Susiati et al. (nda) dilakukan dengan metode survei pada daerah yang terdekat dengan Semenanjung Muria yang merupakan lokasi tapak PLTN yang memiliki biota karang. Analisis kandungan logam berat menggunakan metode AAS dengan memisahkan antara *tissue*. Hasil yang didapatkan untuk pengukuran logam berat Cu pada *tissue* karang untuk spesies *Acropora* di setiap stasiun berturut-turut dalam ppm adalah 0.28; 0.41; 0.41; ttd; dan ttd.

Penelitian Faiz et al. (2013) dilakukan dengan meneliti kandungan logam Pb dan Cu pada karang *Pocillopora damicornis* dengan menggunakan metode deskriptif dengan pemeriksaan dan pengukuran. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *purposive sampling* pada enam stasiun. Pengukuran logam berat menggunakan metode AAS dengan prosedur Standar Nasional Indonesia, SNI 06-6992.3-2004 untuk analisis Pb dan SNI 06-6992.5-2004 untuk analisis Cu. Hasil penelitian dalam ppm didapatkan berturut-turut untuk 6 stasiun untuk logam Pb dengan rata-rata 0,00405; 0,00391; 0,00256; 0,00242; 0,00222; dan 0,00143. Sedangkan untuk Cu hanya terdeteksi dalam 3 stasiun, dengan rata-rata 0,00071; 0,00252; dan 0,01121. Terdeteksinya logam pada karang menandakan adanya degradasi karang yang disebabkan oleh peningkatan polusi air laut dan akan mempengaruhi karang dan *Zooxanthellae* yang berasosiasi dengan karang.

Penelitian Mellawati & Bachtiar (2011) dilakukan dengan menggunakan karang masif *Porites* sp dengan menilai logam Pb dan Cd menggunakan metode AAS. Melalui penelitian ini dikaitkan antara lingkaran tahun dan kandungan logam yang ada pada karang. Hasil didapatkan rata-rata akumulasi logam Pb di karang didapatkan beragam dari tiga stasiun dan lingkaran tahun yang beragam. Adanya akumulasi logam di karang dikarenakan logam yang terserap pada mineral sulfida yang berasal dari industri yang ada.

Penelitian Esslemont (2000) dengan judul dilakukan dengan metode AAS dengan melihat kandungan logam Pb dan Cu di *tissue* dan *skeletons* yang dimana dihasilkan bahwa konsentrasi logam lebih tinggi pada jaringan karang dibandingkan kerangkanya. Toleransi yang dihasilkan antara jaringan dan logam bervariasi oleh spesies yang berbeda yang dimana spesies yang memiliki jumlah *zooxanthellae* yang berbeda dapat menganulir logam dengan tingkat yang berbeda pula.

Penelitian Dar et al. (2018) dilakukan di perairan sisi timur Teluk Suez dan sisi barat Teluk Aqaba dengan menggunakan karang *Acropora* spp. dan dideteksi menggunakan AAS dengan batas deteksi 0,01 ppm. Didapatkan konsentrasi logam Pb dan Cu dalam satuan $\mu\text{g/g}$ masing-masing dari sampel *Acropora forskali*, *Acropora variables*, *Acropora nasuta*, dan *Acropora digitifera* sebesar 30.83 dan .67; 0.82 dan 4.16; serta 11.87 dan 4.71. berdasarkan hasil ini, akumulasi logam Pb dan Cu yang didapatkan dari spesies pengambilan data yang berbeda. Secara umum, spesies karang dari Wadi Teluk Suez mencatat kecenderungan akumulasi bio tinggi secara signifikan yang menunjukkan kontribusi luar biasa sis darat (kegiatan pertambangan dan eksplorasi minyak). Variasi



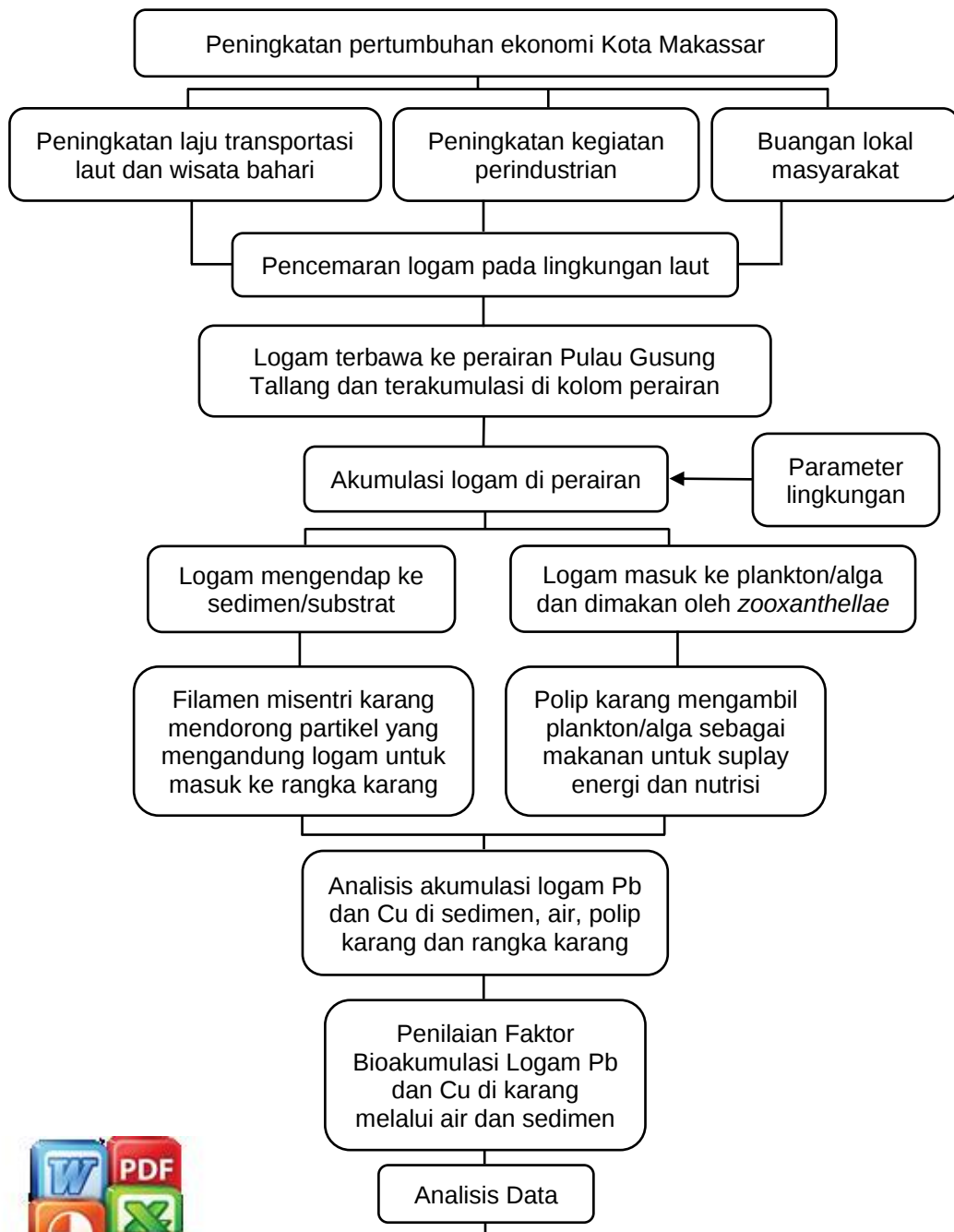
di antara spesies karang menunjukkan bahwa bioakumulasi logam berat pada spesies tertentu. Perbedaan konsentrasi spasial untuk logam yang berbeda ini menunjukkan bahwa mereka dipengaruhi oleh kondisi fisik dan kimia dari alam dan aktivitas manusia.

Penelitian Subdomo (2009) dilakukan di Pulau Kemujan dan Pulau Menjangan Kecil, Kepulauan Karimunjawa. Sampel yang digunakan adalah *Acropora aspera* dengan menggunakan AAS. Rata-rata yang didapatkan untuk logam Cu adalah $4,62 \pm 1,52 \text{ mg kg}^{-1}$ dan Pb sebesar $142,50 \pm 42,57 \text{ mg kg}^{-1}$. Berdasarkan perbandingan Pulau Kemujan dan Pulau Menjangan Kecil didapatkan kadar Pb untuk *Acropora* berturut-turut 97 mg kg^{-1} dan 123 mg kg^{-1} serta kandungan kadar Cu sebesar $5,1 \text{ mg kg}^{-1}$ dan $<3,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Deteksi konsentrasi logam yang sedikit berbeda pada karang dari Pulau Kemujan dan Menjangan Kecil menunjukkan bahwa karang *scleractinian* mungkin memiliki potensi kegunaan dalam program pemantauan polusi, perbedaannya akan lebih signifikan terutama jika diterapkan antara lokasi yang tercemar dan tidak tercemar.



1.6. Kerangka Berpikir

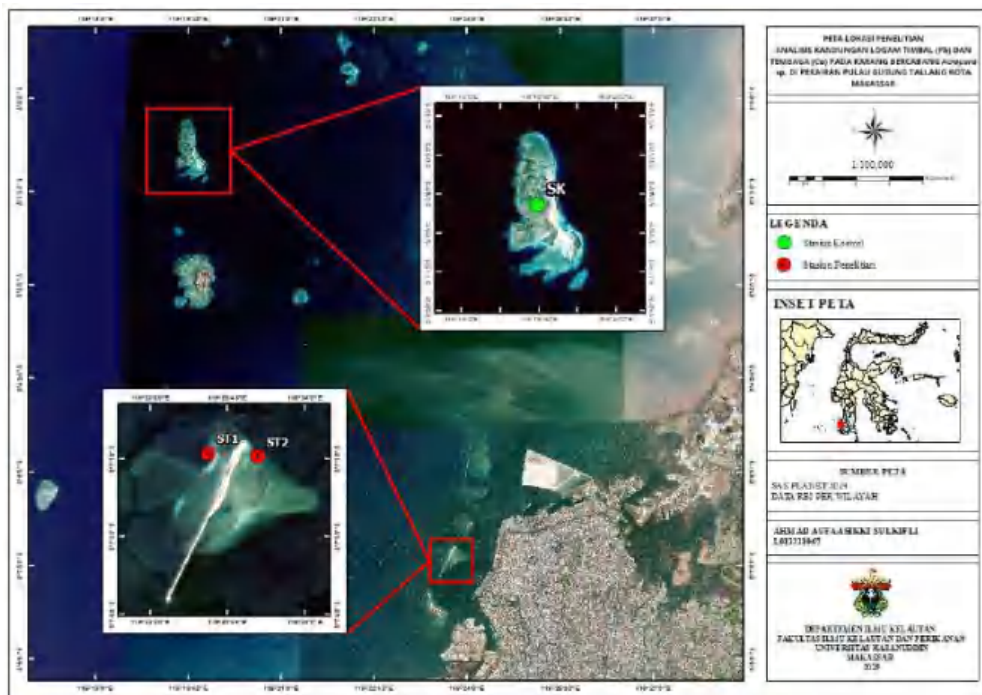
Gambar 3. Kerangka Berpikir



BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini berlangsung pada April hingga Mei 2025, dimulai dengan pengambilan sampel air, sedimen, dan karang pada 16 April 2025 di dua lokasi: Stasiun 1 dan 2 di perairan Pulau Gusung Tallang, Kecamatan Ujung Pandang (lokasi utama), dan Stasiun Kontrol di perairan Pulau Bone Batang, Kecamatan Kepulauan Sangkarrang, Kota Makassar. Identifikasi dan analisis sampel dilakukan di beberapa laboratorium di Universitas Hasanuddin, yaitu; Laboratorium Ekologi Laut FIKP (identifikasi karang), Laboratorium Oseanografi Kimia FIKP (identifikasi densitas *zooxanthellae*), Laboratorium Kualitas Air FIKP (analisis kualitas perairan), Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Faperta (analisis kualitas sedimen), dan Laboratorium Kimia Pakan Fapet (analisis kandungan logam). Lokasi penelitian dapat dilihat dalam peta penelitian yang digambarkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian
(Gusung Tallang et)



2.1. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan sebagai penunjang dan pendukung penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Alat Penelitian

No	Alat	Kegunaan
1	Alat Dasar Selam	Membantu melakukan <i>snorkelling</i>
2	Alat Selam Skuba	Membantu melakukan penyelaman
3	Layang-layang Arus	Mengukur arus perairan
4	<i>Camerer Water Sampler</i>	Mengambil sampel air laut
5	<i>Secchi Disc</i>	Mengukur kecerahan air
6	<i>Global Positioning System (GPS)</i>	Menentukan titik koordinat lokasi penelitian
7	Kompas	Menentukan arah arus
8	<i>Water Quality Tester</i>	Mengukur pH, suhu, dan salinitas perairan dan mengukur pH sedimen
9	<i>Stop Watch</i>	Menghitung waktu
10	Botol Sampel	Menyimpan sampel air
11	<i>Sediment Core</i>	Mengambil sedimen perairan
12	Plastik Sampel	Menyimpan sampel
13	Pahat	Mengambil sampel karang
14	Palu-palu	Mengambil sampel karang
15	<i>Cool Box</i>	Menyimpan sampel air, sedimen dan karang
16	Kamera	Melakukan dokumentasi
17	Kamera Anti-Air	Melakukan dokumentasi di dalam air
18	eH Meter	Mengukur eH sedimen
19	<i>Air Sprayer</i>	Memisahkan polip karang
20	Pipet Tetes	Mengambil dan memindahkan larutan
21	Labu Semprot	Menyemprotkan larutan aquades
22	Kertas Saring <i>Whatman 1,5 µm</i>	Menganalisis TSS perairan
23	Cawan Buchner	Menganalisis TSS perairan
24	Pompa Vakum	Menganalisis TSS perairan
25	Oven	Mengeringkan sampel dan kertas saring
26	Desikator	Mendinginkan kertas saring
27	Gelas Ukur	Menentukan banyaknya (volume) air
28	Gelas Kimia	Meletakkan sampel air, aquades dan larutan
29	Timbangan digital	Menimbang sampel
30	Botol Winkler Terang	Wadah sampel
31	Labu Erlenmeyer	Wadah sampel
32	Buret	Mengukur volume larutan
33	Statip	Penyangga buret
34	<i>Stopcock</i>	Mengatur aliran buret
35	Cawan Porselen	Wadah sedimen
36	Tanur	Memanaskan sedimen
	ulu	Menghaluskan sedimen
	<i>ieve shaker</i>	Wadah sampel
	<i>er Counting Cell</i>	Mengayak sedimen
		Membantu melihat <i>zooxanthellae</i> karang
		Menutup SRCC
		Membantu melihat <i>zooxanthellae</i> karang



Lanjutan Tabel 1.

No	Alat	Kegunaan
43	Hand Counter	Membantu menghitung <i>zooxanthellae</i> karang
44	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	Menganalisa kandungan logam pada sampel
45	Alat Tulis Menulis	Mencatat hasil penelitian
46	Sikat	Membersihkan partikel sedimen

Tabel 2. Bahan Penelitian

No	Bahan	Kegunaan
1	Sampel Air	Bahan analisis
2	Sampel Sedimen	Bahan analisis
3	Sampel Karang <i>Acropora</i>	Bahan analisis
4	Larutan Mangan Sulfat ($MnSO_4$)	Pereaksi pengukuran oksigen terlarut
5	Larutan Kalium Iodida + Natrium Hidroksida (KI + NaOH)	Pembebas iodium
6	Larutan Asam Sulfat (H_2SO_4)	Pelarut endapan oksigen terlarut
7	Larutan Natrium Thiosulfat ($Na_2S_2O_3$)	Agen titrasi oksigen terlarut
8	Larutan Amilum (<i>Starch Soluble</i>)	Indikator akhir titrasi oksigen terlarut
9	Aquades	Kalibrasi dan sterilisasi alat
10	Kertas Saring 1,5 μm	Penyaring larutan
11	Larutan Lugol	Pengawet <i>zooxanthellae</i>
12	Larutan HNO_3	Memisahkan kandungan bahan anorganik dari sampel
13	$HClO_4$	Melarutkan kandungan bahan organik dari sampel
14	Label	Penanda
15	Tissue	Pengering alat

2.2. Metode Penelitian

2.2.1. Persiapan

Tahap persiapan diperlukan untuk melakukan penelusuran dan peninjauan akan pustaka-pustaka terkait kondisi umum lokasi penelitian, pemantauan lokasi penelitian, melakukan studi literatur dan melakukan konsultasi pada pembimbing.

2.2.2. Penentuan Stasiun

Penentuan stasiun dilakukan dalam pengambilan data maupun sampel yang dilakukan guna menentukan lokasi penelitian berdasarkan beberapa hal seperti



aktivitas antropogenik dan kondisi yang dapat mempengaruhi an titik dilakukan dengan menggunakan metode *purposive* al., 2022; Syafni et al., 2022; dan Fernandes et al., 2023). Metode y merupakan metode pengambilan sampel (penentuan lokasi) adaan ekosistem terumbu karang yang ada. Penentuan titik stasiun uji dan satu stasiun kontrol yang dimana dua stasiun uji

berada di Pulau Gusung Tallang, serta satu stasiun kontrol berada di Pulau Bone Batang. Keterangan penentuan titik lokasi penelitian disajikan pada **Tabel 3**. Pengambilan data, pengukuran parameter dan pengambilan sampel dilakukan sebanyak tiga kali ulangan di setiap stasiun.

Tabel 3. Lokasi penelitian

Stasiun	Keterangan
Stasiun 1	Stasiun uji, terletak di bagian barat Pulau Gusung Tallang, Kecamatan Ujung Pandang, Kota Makassar
Stasiun 2	Stasiun uji, terletak di bagian timur Pulau Gusung Tallang, Kecamatan Ujung Pandang, Kota Makassar
Stasiun Kontrol	Stasiun kontrol, terletak di bagian barat Pulau Bone Batang, Kecamatan Sangkarang, Kota Makassar

2.2.3. Pelaksanaan Penelitian

a. Pengambilan Sampel Air

Pengambilan sampel air (Sulistyo et al, 2024) dilakukan dengan menggunakan alat *Kemmerer water sampler* (pengambil sampel air kemmerer) yang dijatuhkan ke dalam kolom air perairan kemudian dimasukkan ke dalam botol sampel maupun botol winkler. Air laut dimasukkan ke dalam botol sampel sebanyak 500mL guna mengukur kadar TSS dan kandungan logam Pb dan Cu, selanjutnya 350mL sampel air dimasukkan ke dalam botol winkler guna mengukur kadar DO. Setelah masing-masing botol telah diisi air sampel, kemudian diberikan penanda menggunakan label dan dimasukkan ke dalam *cool box* yang kemudian dibawa ke laboratorium untuk diadakan pengujian. Terdapat sembilan sampel air yang berasal dari tiga stasiun dan di setiap stasiun memiliki tiga ulangan.

1. Pengukuran Parameter Fisika dan Kimia Perairan

a) Salinitas, Suhu dan Derajat Keasaman (pH) Perairan

Pengukuran parameter salinitas, suhu dan derajat keasaman (pH) di perairan dilakukan secara langsung (*in situ*) berdasarkan titik yang telah ditentukan sebelumnya. Air dimasukkan ke dalam gelas kimia sebagai wadah kemudian mencelupkan *water quality tester* (penguji kualitas perairan) yang menggunakan sensor nirkabel pada alat ukur untuk mendapatkan ukuran suhu, salinitas dan pH air pengukuran ini (Vincentius, 2025; dan Usup et al., 2025). Sebelum digunakan, alat *Water Quality Tester* dikalibrasi dengan cara membas sensor elektroda (*pulp*) menggunakan aquades lalu dikeringkan dengan menggunakan tisu. Kemudian *pulp* dimasukkan ke dalam gelas kimia yang sebelumnya sudah berisikan dengan *display* alat menunjukkan hasil pembacaan parameter



Oxygen (DO) Perairan

eter kadar *dissolved oxygen* (DO) pada perairan tidak dilakukan melainkan dilakukan di laboratorium (*ex situ*). Pengukuran DO

menggunakan metode titrasi (Pakambanan, 2016) dengan pertama-tama air yang telah diambil dan dimasukkan ke dalam botol winkler kemudian ditambahkan 1mL larutan Mangan Sulfat (MnSO_4) dan 1mL larutan $\text{NaOH}+\text{KI}$ dengan menggunakan pipet tetes kemudian dihomogenkan dan diamkan sampai terbentuk endapan. Selanjutnya, ketika sudah terbentuk endapan, ditambahkan 1mL larutan H_2SO_4 pekat dengan menggunakan pipet tetes lalu dihomogenkan sampai endapannya larut. Selanjutnya menambahkan natrium thiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) sebagai bahan penetrase sehingga terjadi perubahan warna pada sampel menjadi kuning muda. Selanjutnya, menambahkan indikator amilum sehingga warna kembali berubah menjadi ungu dan kembali dititrasi dengan larutan natrium thiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) sampai larutan berubah warna menjadi bening (tidak berwarna). Nilai DO dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{DO (mg/L)} = \frac{1000 \times A \times N \times 8}{\left(\frac{V_c \times V_b}{(V_b - 6)} \right)}$$

Keterangan:

A = volume larutan natrium thiosulfat yang digunakan (mL)

V_c = volume larutan yang dititrasi (mL)

N = kenormalan larutan natrium thiosulfat

V_b = volume botol (300 mL)

c) Kecerahan Perairan

Pengukuran parameter kecerahan perairan dilakukan secara langsung (*in situ*) berdasarkan titik yang telah ditentukan sebelumnya. Pengukuran parameter kecerahan (Pingki & Sudarti, 2021) perairan menggunakan alat *secchi disc* yang dilepaskan sampai ke dasar perairan. Alat dilepaskan ke air kemudian dilihat dan dihitung jarak atau kedalaman berapa alat tampak dan tidak tampak dari alat. Kecerahan kemudian dihitung dengan rumus:

$$K = \frac{d_1 + d_2}{z}$$

Keterangan:

K = Kecerahan (m)

d_1 = jarak tak tampak

d_2 = jarak tampak

z = kedalaman

d) Arus Perairan

Pengukuran parameter arus perairan dilakukan secara langsung (*in situ*) yang telah ditentukan sebelumnya. Pengukuran parameter arus) dilakukan dengan alat layang-layang arus yang dilepaskan ke an terbawa arus hingga tali yang terulur memanjang secara lurus. atch digunakan untuk menghitung rentang waktu yang dibutuhkan arus mulai dari awal pelepasan tali hingga tali terbentang dengan



sempurna. Pada akhirnya, kompas digunakan untuk mengetahui arah arus. Kecepatan arus dapat dihitung dengan rumus:

$$v = \frac{s}{t}$$

Keterangan:

v = Kecepatan arus (m/s)

s = Panjang Lintasan parasut arus (m)

t = Waktu tempuh layang-layang arus (s)

e) TSS (Total Suspended Solid) Perairan

Pengukuran parameter kadar *total suspended solid* (TSS) pada perairan tidak dilakukan secara langsung melainkan dilakukan di laboratorium (*ex situ*). Air yang sebelumnya sudah dimasukkan ke dalam botol sampel selanjutnya dipindahkan ke gelas ukur. Pengujian TSS menggunakan metode *gravimetry* (Paramita et al., 2017) Pertama-tama menimbang kertas saring yang sebelumnya telah dikeringkan dengan oven sehingga memperoleh berat tetap. Selanjutnya kertas saring diletakkan ke dalam cawan buchner kemudian dibilas dengan aquades, selanjutnya menyalakan pompa vakum dan secara bersamaan menuangkan 100mL larutan yang kemudian akan disaring dan menyisakan endapan atau residu. Selanjutnya kertas saring yang telah terisi residu dipindahkan ke cawan petri dan dikeringkan kembali menggunakan oven dan setelah kering didinginkan menggunakan desikator. Setelah itu, kertas saring ditimbang menggunakan timbangan digital untuk mendapatkan berat akhir. Hasil akhir pengukuran TSS dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1000}{C}$$

Keterangan:

A = berat kertas saring berisi residu (mg)

B = berat kertas saring kosong (mg)

C = volume sampel air (L)

b. Pengambilan Sampel Sedimen

Pengambilan sampel sedimen dilakukan pengambilan sedimen pada area bagian bawah atau substrat terumbu karang (Maulina, 2024). Pengambilan sedimen menggunakan *core sampling* dengan menggunakan alat *sediment core* sepanjang 30cm dengan diameter 5cm, kemudian menyimpan sampel sedimen ke dalam plastik sampel dan memasukkannya ke dalam *cool box*. Pengambilan sampel sedimen dilakukan di setiap stasiun dengan masing-masing stasiun memiliki tiga kali ulangan yang menghasilkan sembilan sampel sedimen.



in Parameter Fisika dan Kimia Sedimen

asaman (pH) Sedimen

it keasaman (pH) dilakukan secara langsung (*in situ*) yang modifikasi metode dari Pinotoan et al. (2023). Pengukuran pH akan *water quality tester* dilakukan dengan mengukur pH air

sisipan (*pore water*) yang ada di dalam sedimen, sedimen yang sebelumnya telah dimasukkan ke dalam plastik sampel kemudian ditancapkan probe *water quality tester* ke dalamnya sampai dengan pembacaan stabil. Sebelum dan setelah penggunaan alat dilakukan pengkalibrasian dengan menggunakan aquades.

b) Potensial Redoks (eH) Sedimen

Pengukuran potensial redoks (eH) sedimen dilakukan secara langsung (*in situ*) yang dilakukan dengan menggunakan eH meter digital (Najamuddin et al., 2020). Sampel yang sebelumnya telah dimasukkan ke dalam plastik sampel kemudian ditancapkan probe eH meter digital dan menunjukkan hasil yang stabil pada display eH meter digital. Alat perlu disterilkan menggunakan aquades sebelum dan setelah alat digunakan.

c) Ukuran Butir Sedimen

Analisis besar butir sedimen dengan metode *sieve analysis* atau metode pengayakan (Hasanuddin, 2013; Khoolisoh, 2025) yang dimana mengeringkan sampel sedimen menggunakan oven selama 3x24jam pada suhu 150°C. Setelah sampel kering, selanjutnya sampel didinginkan dihomogenkan dengan memecah agregat sedimen dengan menggunakan lumpang dan alu. Setelah halus, kotoran-kotoran dan pecahan-pecahan cangkang biota dari sedimen dibersihkan. Selanjutnya menimbang 100gram sampel kemudian diayak menggunakan *sieve shaker* yang didalamnya berisi *sieve net*. Ukuran jaring pada alat berjenjang dari 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm, 0,063mm, dan <0,063mm. Kemudian hasil ayakan sampel dipisahkan sesuai dengan ukurannya menggunakan cawan petri kemudian ditimbang menurut hasil ayakan masing-masing ukuran sampel. Persentase butir sedimen pada metode pengayakan kering ini dihitung menggunakan rumus berikut:

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

Setelah dilakukan perhitungan berat, selanjutnya mengelompokkan ukuran butir sedimen menurut diameternya yang kemudian dihitung menggunakan logaritma phi (Φ) diameter butir sedimennya agar dapat diklasifikasikan menurut analisis ukuran sedimen menurut *Wentworth*. Skala *Wentworth* untuk mengklasifikasikan partikel disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Skala *Wentworth* Sedimen (Sumber: Khoolisoh, 2025)

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
asir kasar (<i>coarse sand</i>)	0,5 – 1
asir sedang (<i>medium sand</i>)	0,25 – 0,5
asir halus (<i>fine sand</i>)	0,125 – 0,25
asir sangat halus (<i>very fine sand</i>)	0,0625 – 0,125
	0,002 – 0,0625
	0,0005 – 0,002
Material terlarut (<i>dissolved material</i>)	<0,0005



d) Bahan Organik Total (BOT) Sedimen

Pengukuran bahan organik total (BOT) pada sedimen dilakukan tidak secara langsung (*ex situ*) dengan menggunakan metode *Walkley and Black* dengan menghitung kadar c-organik yang kemudian diperoleh kandungan BOT (Nugraha & Hudatwi, 2020; dan Fauzi et al., 2020). Sampel sedimen dikeringkan dengan suhu ruang kemudian ditimbang menggunakan timbangan analitik sebanyak 0,05mg dan diberikan larutan $K_2Cr_2O_7$ 0,2N (10mL) yang kemudian ditambahkan H_2SO_4 pekat (20mL) yang kemudian dihomogenkan selama 1menit, dan diamkan selama 30menit. Selanjutnya ditambahkan 200mL aquades, 10mL H_3PO_4 85% dan 0,5mL indikator Diphenylamine $(C_6H_5)_2NH$ kemudian dihomogenkan dan dibiarkan dingin dan kemudian dititar menggunakan ferro sulfat $FeSO_4$ 0,2N. Selanjutnya kandungan C-organik dihitung menggunakan rumus:

$$C = \frac{(mL\ Blanko - mL\ Sampel) \times N \times 1,33 \times 3}{mg\ Sampel} \times 1000$$

$$\% C = C \times Faktor\ Koreksi$$

Setelah mendapatkan nilai C-Organik kemudian memperoleh nilai Bahan Organik melalui rumus:

$$Bahan\ Organik = \%C \times 1,724$$

Keterangan:

mL Blanko = Volume titran untuk blanko (mL)

mL Sampel = Volume titran untuk sampel (mL)

N = Normalitas $FeSO_4$

$1,33 \times 3$ = Ekuivalen berat karbon dalam gram per mL larutan dikromat 1N

1,724 = Faktor koreksi karbon organik

c. Pengambilan Sampel Karang

1. Rangka Karang

Pengambilan sampel karang dilakukan dengan metode *purposive sampling* (Riska et al., 2022, Syafni et al., 2022; dan Fernandes et al., 2023). Pertama-tama melakukan penyelaman kemudian menentukan jenis karang yang diambil dalam hal ini *Acropora* bercabang. Pengambilan dilakukan dengan mengambil $\pm 5\%$ dari satu koloni yang kemudian dipotong menggunakan pahat besi dan palu-palu. Setelahnya sampel karang dimasukkan ke dalam plastik sampel, diberikan label sebagai penanda dan dimasukkan ke dalam *cool box* untuk selanjutnya dilakukan analisis di laboratorium. Akan terdapat sembilan sampel rangka karang yang berasal dari tiga stasiun yang dimana setiap stasiun memiliki tiga ulangan.



ng

el polip karang dilakukan dengan metode *air brush* (Bara'la'ngi, polip karang dilakukan dengan menggunakan karang yang liambil dan diletakkan di dalam plastik sampel, ke dalam plastik *sprayer* dimasukkan yang telah dihubungkan dengan tabung

oksigen. Selanjutnya mengarahkan selang *air sprayer* ke area pertumbuhan polip sehingga polip terlepas dan menempel pada permukaan plastik sampel, selanjutnya polip yang telah terpisahkan disatukan dan diletakkan ke dalam plastik sampel untuk selanjutnya dilakukan analisis.

3. *Zooxanthellae* Karang

Preparasi sampel *zooxanthellae* karang dilakukan dengan mengambil polip yang sebelumnya telah dipisahkan dari kerangka karang yang selanjutnya diencerkan menggunakan aquades 100mL, selanjutnya larutan yang telah berisi *zooxanthellae* karang dimasukkan ke dalam botol sampel dan ditambahkan lugol sebanyak 5 tetes sebagai bahan pengawet (Narfa et al., 2024). Kemudian dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 10x. Pengamatan dilakukan dengan menuangkan larutan berisi pengenceran *zooxanthellae* ke atas SRCC dan ditutup dengan *cover glass*. Kemudian pengamatan dilakukan dengan tiga kali pengulangan untuk setiap sampel.

2.2.4. Pengamatan dan Pengukuran

a. Analisis Kandungan Logam Pb dan Cu pada Air

Analisis kandungan logam di dalam air menggunakan metode spektrofotometri serapan atom (SSA) (Khotimah, 2022). Sampel air dituangkan sebanyak 10mL ke dalam tabung *digestion block* kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman no.42. Konsentrasi logam diukur menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Untuk logam Pb dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang 217,0 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Sedangkan untuk logam Cu dilakukan pengukuran panjang gelombang 324,7nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Pengukuran logam Pb dan Cu menggunakan detektor *photomultiplier tube*.

b. Analisis Kandungan Logam Pb dan Cu pada Sedimen

Analisis kandungan logam pada sedimen dilakukan dengan menggunakan metode AAS (Awaliyah, 2018). Sampel sedimen sebelumnya dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama ± 3 jam. Setelah proses pengeringan, sampel sedimen dihaluskan. Sebanyak 2gram 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 perklorat (HClO_4) ditambahkan secara bertahap, diikuti pemanasan lanjutan selama satu jam.



reaksi kemudian diencerkan dengan 100 mL aquades dan disaring dengan kertas saring Whatman no. 42. Konsentrasi logam diukur dengan AAS. Untuk logam Pb dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang 217,0 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Sedangkan untuk logam Cu dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang 324,7 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Pengukuran logam Pb dan Cu menggunakan detektor *photomultiplier tube*.

c. Analisis Densitas *Zooxanthellae* Karang

Analisis densitas *zooxanthellae* karang (Salim et al., 2020) dilakukan dengan pertama-tama sampel *zooxanthellae* yang sebelumnya telah diencerkan dengan aquades 100mL kemudian dimasukkan ke dalam botol sampel dan ditambahkan 5 tetes lugol selanjutnya dihitung/dicacah dengan menuangkan sampel larutan *zooxanthellae* menggunakan pipet tetes ke SRCC (*Sedgwick rafter counting cell*) ditutup dengan *cover glass* dan diamati melalui mikroskop dengan perbesaran 10kali dengan 3 kali ulangan untuk masing-masing sampel. Selanjutnya *zooxanthellae* yang terlihat dihitung menggunakan *hand-counter*. Kepadatan (densitas) *Zooxanthellae* karang kemudian diperoleh melalui rumus:

$$D = \frac{Q \times P}{L}$$

Keterangan:

D = Densitas *Zooxanthellae*

Q = Jumlah Perhitungan

P = Pengenceran

L = Luasan Fragmen Karang

d. Analisis Kandungan Logam Pb dan Cu pada Rangka Karang

Analisis kandungan logam pada rangka karang menggunakan metode AAS (Riska et al., 2022) yang dimana rangka karang yang telah dibersihkan menggunakan aquades kemudian diletakkan ke atas cawan petri dan dimasukkan ke dalam oven untuk kemudian dikeringkan pada suhu 105°C dan ditimbang seberat 5gram. Sampel karang yang telah ditimbang selanjutnya dimasukkan ke dalam cawan porselin dan dimasukkan kembali ke dalam oven dengan suhu 500°C selama 2-3 jam sampai sampel karang menjadi abu dan berwarna putih. Sebanyak 2gram sampel polip 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 (HNO₃) pada suhu 100°C selama dua jam. Setelah pendinginan selama 15 menit, 0,5 mL asam perklorat (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). Untuk logam Pb dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang 217,0 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Sedangkan untuk logam Cu dilakukan pengukuran panjang gelombang 324,7 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Pengukuran logam Pb dan Cu menggunakan detektor *photomultiplier tube*.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

Kandungan Logam Pb dan Cu pada Polip Karang

Logam pada polip karang menggunakan metode AAS (Salim et al., 2018; Bara'la'ngi, 2021; dan Riska et al., 2022). Setelah digunakan metode *air brush* polip yang telah terpisah dari karang kemudian ditimbang sebanyak 5gram dan kemudian dikeringkan

menggunakan oven. Sebanyak 2gram sampel polip 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 perklorat (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). Untuk logam Pb dilakukan pengukuran dengan panjang gelombang 217,0 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Sedangkan untuk logam Cu dilakukan pengukuran panjang gelombang 324,7 nm dengan limit deteksi 0,001ppm. Pengukuran logam Pb dan Cu menggunakan detektor *photomultiplier tube*.

f. Analisis Data

Penentuan kualitas air pada perairan dilakukan dengan baku mutu air laut dengan standar baku mutu air laut yang merujuk pada Standar Baku Mutu Air Laut untuk Biota Coral yang tertuang dalam Lampiran VIII Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pada **Tabel 5**. Penentuan status pencemaran logam Pb dan Cu pada air ditentukan menggunakan Standar Baku Mutu Air Laut untuk Biota Coral yang tertuang dalam Lampiran VIII Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pada **Tabel 6**. Penentuan status pencemaran logam Pb dan Cu pada sedimen ditentukan dengan menggunakan Standar Baku Kualitas Sedimen berdasarkan *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand* (ANZECC & ARMCANZ, 2000) dalam *Water Quality Guidelines Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality* (ANZG, 2018) pada **Tabel 7**.

Tabel 5. Standar Baku Mutu Perairan Laut untuk Biota Laut (Coral)

Parameter	Standar Baku Mutu	Satuan
Suhu	28 - 30	$^\circ\text{C}$
Salinitas	33-34	ppt
Derajat Keasaman (pH)	7 – 8,5	-
Kecerahan	>5	m
Padatan Tersuspensi Total (TSS)	20	mg/L
Oksigen Terlarut	>5	mg/L

(Sumber: PP RI No. 22 Tahun 2021)



aku Mutu Logam di Perairan untuk Biota Laut

ameter	Standar Baku Mutu	Satuan
	0,008	mg/L
	0,008	mg/L

.22 Tahun 2021)

Tabel 7. Standar Baku Mutu Logam di Sedimen

Parameter	Standar Baku Mutu		Satuan
	ISQG-Low	ISQG-High	
Timbal (Pb)	50	220	mg/Kg
Tembaga (Cu)	65	270	mg/Kg

(Sumber: ANZG, 2018)

Keterangan:

ISQG-Low : Konsentrasi di bawah nilai ini secara umum berarti risiko ekotoksik rendah bagi ekosistem benthik

ISQG-High : Bila konsentrasi melebihi nilai ini, risiko efek ekotoksik secara biologis diperkirakan tinggi dan dapat menimbulkan dampak nyata pada organisme dasar perairan.

g. Analisis Kemampuan Akumulasi Logam pada Karang dengan menggunakan Faktor Bioakumulasi (BCF)

Nilai faktor bioakumulasi (BAF) (Reza, 2014; dan Filipus et al., 2018) digunakan untuk mengetahui kemampuan karang dalam mengakumulasi logam. Nilai BAF sebagai suatu ukuran nilai dari kemampuan organisme dalam hal ini karang dalam mengambil bahan pencemar langsung dari lingkungan yang ada disekitarnya yaitu di kolom air dan sedimen perairan. Rumus digunakan untuk melihat bioakumulasi dinyatakan dalam BAF untuk konsentrasi logam pada organisme dalam hal ini karang (Co) dan air (Cw) sedangkan BASF digunakan untuk rasio konsentrasi organisme dalam hal ini karang (Co) dan sedimen (Cs).

$$BAF = \frac{CO}{CW} \quad BASF = \frac{CO}{CS}$$

Keterangan:

CO = Konsentrasi logam pada organisme (Karang)

CW = Konsentrasi logam pada air

CS = Konsentrasi logam pada sedimen

h. Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengidentifikasi kadar logam berat Pb dan Cu yang terakumulasi pada polip karang, rangka karang, sedimen, dan air menggunakan metode One-Way Analysis of Variance (ANOVA). Apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan yang signifikan secara statistik ($p < 0,05$), maka dilanjutkan dengan uji lanjut menggunakan metode Beda Nyata Terkecil (BNT) Tukey guna mengetahui perbedaan antar kelompok perlakuan. Hubungan antara parameter fisika-kimia perairan terhadap konsentrasi logam dianalisis menggunakan metode Principal s (PCA) untuk menggambarkan keterkaitan antar variabel secara tu, uji korelasi dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antara pada polip karang dan air dengan densitas *zooxanthellae* pada luruh analisis statistik dilakukan dengan bantuan perangkat lunak STAT, dan SPSS.

