

**SEBARAN HORIZONTAL *TRACE ELEMENTS* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn DAN ^{60}Ni)
PADA SEDIMEN LAUT DALAM DI PERAIRAN SELAT MAKASSAR
DAN SELAT LOMBOK**

SKRIPSI

Oleh

**ELSA ADELIA
NPM 2214221025**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**SEBARAN HORIZONTAL *TRACE.ELEMENTS* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn DAN ^{60}Ni)
PADA SEDIMEN LAUT DALAM DI PERAIRAN SELAT MAKASSAR
DAN SELAT LOMBOK**

Oleh

ELSA ADELIA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Perikanan dan Kelautan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

SEBARAN HORIZONTAL *TRACE.ELEMENTS* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn DAN ^{60}Ni) PADA SEDIMEN LAUT DALAM DI PERAIRAN SELAT MAKASSAR DAN SELAT LOMBOK

OLEH

ELSA ADELIA

Trace elements seperti ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , dan ^{60}Ni merupakan kontaminan anorganik yang cenderung terakumulasi pada sedimen laut dalam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sebaran horizontal konsentrasi *trace elements*, ukuran butir sedimen, serta tingkat kontaminasi *trace elements* di perairan Selat Makassar dan Selat Lombok. Sampel sedimen dianalisis menggunakan ICP-MS dan PSA, kemudian dievaluasi menggunakan pemetaan spasial, *Contamination Factor* (CF), *Pollution Load Index* (PLI), dan *Principal Component Analysis* (PCA). Hasil menunjukkan Seng (^{66}Zn) memiliki konsentrasi rata-rata tertinggi. Distribusi spasial *trace elements* menunjukkan tren penurunan dari utara ke selatan, dengan konsentrasi tertinggi di Selat Makassar Utara, yang diduga kuat berasal dari limpasan daratan. Analisis PCA mengkonfirmasi korelasi negatif yang kuat antara konsentrasi *trace elements* ^{208}Pb , ^{52}Cr , ^{60}Ni dengan ukuran sedimen, yang berarti akumulasi tinggi terjadi pada fraksi sedimen halus (*clay*). Tingkat kontaminasi sedimen secara umum berada pada kategori rendah, meskipun titik tertinggi terdeteksi di utara. Penelitian tersebut penting sebagai dasar pemantauan kualitas lingkungan laut di kedua wilayah tersebut.

Kata Kunci: Karakteristik Biogeokimia, Sedimen Laut Dalam, Selat Makassar, Tingkat Pencemaran, *Trace Elements*

ABSTRAK

HORIZONTAL DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , AND ^{60}Ni) IN DEEP SEA SEDIMENTS IN THE WATERS OF THE MAKASSAR STRAIT AND THE LOMBOK STRAIT

By

ELSA ADELIA

Trace elements such as ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , and ^{60}Ni are inorganic contaminants that tend to accumulate in deep-sea sediments. This study was aimed to analyze the horizontal distribution of trace-element concentrations, sediment grain size, and the level of trace-element contamination in the waters of the Makassar Strait and Lombok Strait. Sediment samples were analyzed using Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS) and Particle Size Analysis (PSA), and subsequently evaluated through spatial mapping, Contamination Factor (CF), Pollution Load Index (PLI), and Principal Component Analysis (PCA). The results indicate that zinc (^{66}Zn) exhibits the highest average concentration among the analyzed trace elements. The spatial distribution of trace elements shows a decreasing trend from north to south, with the highest concentrations observed in the northern Makassar Strait, which are strongly associated with terrestrial runoff inputs. PCA results confirm a strong negative correlation between the concentrations of ^{208}Pb , ^{52}Cr , and ^{60}Ni and sediment grain size, indicating higher accumulation in fine-grained sediments (clay). Overall, sediment contamination levels are classified as low, although relatively higher values are detected in the northern area. This study provides an important scientific basis for monitoring and managing marine environmental quality in both regions.

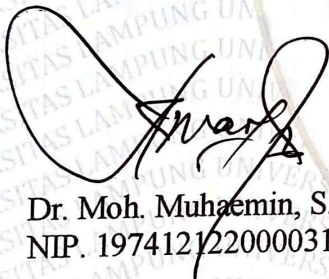
Keywords: Biogeochemical Characteristics, Contamination Level, Deep-Sea Sediment, Makassar Strait, Trace Elements

Judul Skripsi : SEBARAN HORIZONTAL *TRACE ELEMENTS*
(²⁰⁸Pb, ⁶³Cu, ⁵²Cr, ⁶⁶Zn DAN ⁶⁰Ni) PADA
SEDIMEN LAUT DALAM DI PERAIRAN
SELAT MAKASSAR DAN SELAT LOMBOK

Nama Mahasiswa : Elsa Adelia
Nomor Pokok Mahasiwa : 2214221025
Program Studi : Ilmu Kelautan
Fakultas : Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



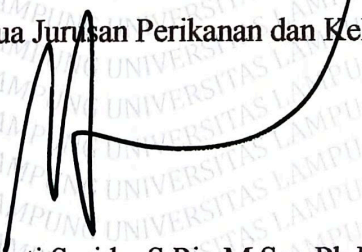
Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si.
NIP. 197412122000031002



TT ELEKTRONIK

Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si.
NIP. 198207122005012012

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan



Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198309232006042001



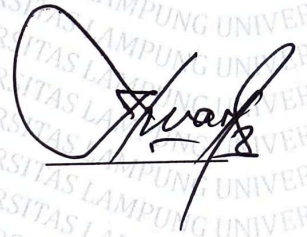
Dokumen ini ditandatangani
secara elektronik menggunakan
sertifikat dari BSR/E, silakan
lakukan verifikasi pada dokumen
elektronik yang dapat diunduh
dengan melakukan scan QR Code

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si.



Sekretaris

: Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si.

 TT ELEKTRONIK

Penguji

Bukan Pembimbing

: Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T.



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002

Tanggal lulus ujian skripsi : 07 Januari 2026

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah skripsi yang berjudul **“Sebaran Horizontal *Trace Elements* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , dan ^{60}Ni) pada Sedimen Laut Dalam di Perairan Selat Makassar dan Selat Lombok”** tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh pihak lain untuk memperoleh gelar akademik, serta tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan serta daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa dalam naskah skripsi ini terdapat unsur fabrikasi, falsifikasi, plagiarisme, dan/atau konflik kepentingan, maka saya bersedia skripsi ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (S1) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional, Pasal 25 ayat (2) dan Pasal 70).

Bandar Lampung,

2026

Yang membuat pernyataan



Elsa Adelia

NPM. 2214221025

RIWAYAT HIDUP

Elsa Adelia lahir di Sendang Rejo, Kecamatan Sendang Agung, Lampung Tengah pada 17 Januari 2004. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Wahyu Setiawan dan Ibu Atik Rahayu. Penulis memulai pendidikan di TK Atohoriah Sendang Rejo, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SD Negeri 1 Sendang Agung (2010-2016), pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 2 Sendang Agung (2016-2019), dan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Gading Rejo (2019-2022). Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang sarjana (S1) pada tahun 2022 di Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Semasa menjadi mahasiswa, penulis pernah mengikuti sertifikasi selam jenjang A1 *Scuba Diver* pada tanggal 5 Juni 2023 dan sertifikasi selam A2 *Advanced Scuba* pada 29 Desember 2024. Pada tahun 2022, penulis juga melaksanakan kegiatan magang Keramba Jaring Apung (KJA) dengan teknik pembesaran lobster pasir di Balai Besar Perikanan Budidaya Laut (BBPBL) Lampung. Selain aktivitas akademik, penulis aktif dalam berbagai organisasi dan kepanitiaan. Pada tahun 2024, penulis bergabung dalam Tim Publikasi, Dekorasi, dan Dokumentasi (PDD) Program Studi Ilmu Kelautan sebagai sie berita dan informasi, serta pada tahun

2025 bergabung dalam Tim Media Sosial Program Studi Ilmu Kelautan sebagai sie editor. Penulis juga pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Kimia Dasar pada semester ganjil tahun 2023. Di tingkat organisasi, penulis bergabung dengan Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (Himapik) sebagai anggota bidang Pengembangan Minat dan Bakat pada tahun 2024. Pada tahun yang sama, penulis berpartisipasi dalam kegiatan Pengabdian Masyarakat yaitu *Fisheries and Marine Conservation* (FIC) yang diadakan oleh Himapik. Penulis juga dipercaya sebagai sekretaris pelaksana dalam kegiatan lomba *National Essay Competition Maritime Youth Delegate Volume 1* (MYD Vol. 1) tahun 2024.

Beberapa kegiatan lain yang pernah dilaksanakan penulis di antaranya, pada semester genap tahun 2024 mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Wirausaha “*PROTEKSI* Unila 2024,” yaitu program *technopreneurship* mahasiswa Universitas Lampung yang bertujuan menginkubasi bisnis sekaligus mengembangkan jiwa wirausaha mahasiswa melalui kompetisi dan pameran. Selanjutnya, pada Januari 2025 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Tanjung Ratu, Kecamatan Katibung, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Pada semester genap tahun 2025, penulis melaksanakan program MBKM Magang Riset dan kegiatan Praktik Umum di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir (PRTKMMN-ORTN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Pada semester ganjil tahun 2025, penulis mengikuti kegiatan penelitian dan bimbingan ilmiah Tugas Akhir di PRTKMMN-BRIN yang dilaksanakan pada tanggal 19 Agustus-6 Desember 2025. Melalui kegiatan tersebut, penulis dapat menyelesaikan skripsinya

dengan bantuan dosen pembimbing dengan judul “Sebaran Horizontal *Trace Elements* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , dan ^{60}Ni) pada Sedimen Laut Dalam di Perairan Selat Makassar dan Selat Lombok”

Untuk Keluarga Tercinta, Bapak Wakyu Setiawan Dan Ibu Atik Rahayu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur ke hadirat Allah SWT penulis ucapkan, karena atas rahmat dan karunia-Nya penyusunan skripsi dapat terselesaikan.

Skripsi dengan judul “*Sebaran Horizontal Trace Elements (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , dan ^{60}Ni) pada Sedimen Laut Dalam di Perairan Selat Makassar dan Selat Lombok*” merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan tersebut penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian Unila;
2. Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan;
3. Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Utama;
4. Dr. Wahyu Retno Prihatiningsih, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Pembantu/Sekretaris;
5. Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T. selaku Dosen Penguji Utama;
6. Eko Efendi, S.T., M.Si. selaku Ketua Program Studi Ilmu Kelautan;
7. Kedua orang tua, Bapak Wahyu Setiawan dan Ibu Atik Rahayu.

Bandar Lampung,

2026

Elsa Adelia

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xi
DATAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	3
1.4 Kerangka Pikir	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Keadaan Umum Lokasi Penelitian	6
2.2 Proses Biogeokimia.....	7
2.3 <i>Trace Elemens</i> di Lingkungan Laut Dalam.....	8
2.3.1 Pencemaran dan Toksisitas <i>Trace Elements</i>	9
2.3.2 Karakteristik <i>Trace Elements</i>	10
2.3.2.1 Timbal (²⁰⁸ Pb)	10
2.3.2.2 Tembaga (⁶³ Cu).....	11
2.3.2.3 Kromium (⁵² Cr).....	12
2.3.2.4 Seng (⁶⁶ Zn)	12
2.3.2.5 Nikel (⁶⁰ Ni)	13
2.4 Dampak <i>Trace elements</i> Terhadap Lingkungan dan Makhluk Hidup	14
2.5 Peralatan dan Perangkat Lunak Penunjang Penelitian	18
2.5.1 <i>Ocean Data View</i> (ODV) dan ArcGIS.....	18
2.5.2 <i>Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry</i> (ICP-MS)	18
2.5.3 <i>Particle Size Analyzer</i> (PSA)	20
III. METODE PENELITIAN	23
3.1 Waktu dan Tempat.....	23
3.1.1 Waktu Penelitian	23
3.1.2 Tempat Penelitian.....	23
3.2 Karakteristik Lokasi Pengambilan Sampel.....	24
3.3 Alat dan Bahan.....	26
3.4 Prosedur Penelitian	27

3.4.1 Preparasi Sampel Sedimen	28
3.4.2 Analisis <i>Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry</i> (ICP-MS).....	28
3.4.3 <i>Particle Size Analysis</i> (PSA)	29
3.4.4 Analisis Indeks Pencemaran Sedimen	29
3.4.5 Analisis Statistik (<i>Principal Component Analysis</i> /PCA)	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Konsentrasi <i>Trace Elements</i> (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , dan ^{60}Ni).....	33
4.1.1 Sebaran Herizontal <i>Trace elements</i>	33
4.1.2 Indeks Pencemaran Sedimen (CF dan PLI)	39
4.2 Pola Pergerakan Massa Air di Perairan Lokasi Penelitian	42
4.3 Distribusi Ukuran Butir Sedimen	47
4.4 <i>Principal Component Analysis</i> (PCA).....	49
4.4.1 Interpretasi <i>Squared Cosines</i>	51
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1 Simpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	75

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Referensi konsentrasi <i>trace elements</i> di wilayah global & regional.....	15
2. Klasifikasi ukuran partikel menurut (Blott & Pye, 2012; Long <i>et al.</i> , 1995)	22
3. Karakteristik lokasi penelitian.....	24
4. Alat	26
5. Bahan.....	27
6. Kategori pencemaran <i>Contamination Factor</i> (CF).....	30
7. Kategori pencemaran <i>Pollution Load Index</i> (PLI).....	31
8. Analisis konsentrasi regresi linier unsur <i>trace elements</i> sebaran horizontal utara ke selatan.....	35
9. Nilai <i>Contamination Factor</i> (CF) dan <i>Pollution Load Index</i> (PLI) pada sedimen laut di setiap stasiun penelitian.....	40
10. Hubungan variabel sedimen dan <i>trace elements</i> terhadap faktor F1-F4.....	51
11. <i>Squared cosines</i> ($\cos^2$) variabel <i>size</i> dan <i>trace elements</i> terhadap F1-F4.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir	5
2. Skema <i>inductively coupled plasma-mass spectrometry</i> (ICP-MS)	19
3. Skema <i>particle size analyzer</i> (PSA).....	21
4. Peta lokasi penelitian	24
5. Prosedur penelitian secara umum	28
6. Sebaran herizontal <i>trace elements</i>	33
7. Peta distribusi <i>trace elements</i>	37
8. Pola pergerakan massa air luat bulanan dari tahun 2015-2024	43
9. Identifikasi sirkulasi <i>eddy</i> (lingkaran merah) di wilayah penelitian	45
10. Intensitas fraksi sedimen (%) di lokasi penelitian	48
11. PCA ukuran partikel dan <i>trace elements</i> di lokasi penelitian.....	50

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Hasil analisis ICP-MS dan PCA.....	75
2. Perhitungan parameter lingkungan.....	81
3. Peta pola arus per bulan selama 10 tahun di lokasi penelitian	94
4. Proses pengambilan sampel menggunakan ekman grab.....	100
5. Preparasi sampel.....	100
6. Proses destruksi sampel sedimen.....	102
7. Analisis ukuran fraksi sedimen (<i>dynamic light scattering</i>).....	104

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Trace elements merupakan salah satu kontaminan anorganik berbahaya di lingkungan perairan karena sifatnya yang toksik, persisten, tidak dapat terurai secara biologis, dan dapat terakumulasi di dalam organisme (Fu & Wang, 2011; Tchounwou *et al.*, 2012). Unsur-unsur seperti ^{208}Pb (timbal), ^{63}Cu (tembaga), ^{66}Zn (seng), ^{52}Cr (krom), dan ^{60}Ni (nikel) termasuk dalam *trace elements* yang secara alami terdapat di kerak bumi, namun konsentrasinya di lingkungan perairan dapat meningkat secara signifikan akibat aktivitas antropogenik seperti pembuangan limbah industri, pertambangan, transportasi laut, dan pertanian (Alloway, 2012; Singh *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2019).

Di lingkungan laut, *trace elements* umumnya terikat dan terakumulasi pada sedimen yang berfungsi sebagai reservoir utama bagi berbagai kontaminan (Eggleton & Thomas, 2004). Sedimen laut tidak hanya berperan sebagai tempat pengendapan, tetapi juga sebagai indikator penting dalam memantau kualitas lingkungan perairan karena sifatnya yang mampu menyimpan *trace elements* dalam jangka panjang (Zhang *et al.*, 2024). Distribusi dan mobilitas *trace elements* dalam sedimen sangat dipengaruhi oleh karakteristik biogeokimia sedimen, termasuk ukuran partikel, kandungan bahan organik, pH, potensial redoks, dan kandungan karbonat (Álvarez-Ayuso & Abad-Valle, 2017).

Secara global, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui distribusi *trace elements* pada sedimen laut dalam. Penelitian di Laut China Selatan menunjukkan adanya konsentrasi tinggi *trace elements* akibat urbanisasi dan aktivitas pelayaran (Chang, 2012). Penelitian di Teluk Izmir, Turki, juga mengidentifikasi peningkatan konsentrasi *trace elements* seperti ^{52}Cr dan ^{60}Ni yang berasal dari aktivitas pelabuhan dan industri (Özden & Aközcan, 2024).

Penelitian lain di pesisir Norwegia, Laut Baltik, dan Teluk Meksiko menunjukkan akumulasi ^{208}Pb dan ^{66}Zn dalam sedimen akibat aktivitas maritim dan pertambangan (Frank *et al.*, 2001; Paetzel & Schrader, 1991; Szefer *et al.*, 1996). Di Indonesia, penelitian serupa telah dilakukan di beberapa wilayah pesisir seperti Teluk Jakarta (Kusuma, 2019; Kusuma *et al.*, 2015), Teluk Ambon (Tuahatu *et al.*, 2022), dan Selat Madura (Ulfah *et al.*, 2019). Hasil penelitian tersebut umumnya menunjukkan adanya korelasi antara aktivitas manusia dan peningkatan kandungan *trace elements* di sedimen.

Namun, kajian terhadap *trace elements* di sedimen laut dalam Indonesia masih sangat terbatas, padahal perairan laut dalam memiliki peran penting dalam siklus biogeokimia *trace elements* (Anderson, 2020). Selat Makassar dan Selat Lombok merupakan dua wilayah laut dalam yang strategis, menjadi jalur utama arus lintas Indonesia (Arlindo) serta jalur pelayaran internasional (Gordon *et al.*, 2003; Zhang, 2022). Aktivitas manusia di sekitar wilayah pesisir, seperti pelabuhan, pelayaran, dan industri pesisir, berpotensi meningkatkan beban pencemaran *trace elements* ke lingkungan laut (Sulistiawati, 2019). Sedimen pada wilayah laut dalam di Selat Makassar dan Selat Lombok dipengaruhi oleh berbagai proses oseanografi, geologi, dan antropogenik yang kompleks, sehingga penting untuk dikaji kandungan *trace elements* secara ilmiah.

Selain konsentrasi *trace elements*, karakteristik biogeokimia sedimen merupakan aspek penting untuk memahami proses transportasi, akumulasi, dan mobilitas *trace elements* di lingkungan laut. Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa faktor-faktor antara ukuran butir sedimen, kandungan bahan organik, pH, potensi redoks (Eh), dan karbon organik total (TOC) sangat mempengaruhi ikatan *trace elements* dalam sedimen (Khurshid *et al.*, 2021; Álvarez-Ayuso & Abad-Valle, 2017). Penelitian oleh Xu *et al.*, (2015) di Laut Cina Timur menemukan bahwa sedimen bertekstur halus dengan kandungan organik tinggi cenderung mengakumulasi *trace elements* lebih besar dibandingkan dengan sedimen kasar. Penelitian oleh Xu *et al.*, (2022) di pesisir Korea menunjukkan bahwa kondisi redoks yang lebih rendah (reduktif) mendorong pelepasan *trace elements* dari fase padat ke fase air, yang meningkatkan

ketersediaan hayati bagi biota. Penelitian lain oleh Smrzka *et al.*, (2020) menunjukkan bahwa dalam lingkungan laut dalam, interaksi kompleks antara bahan organik, karbonat, dan parameter geokimia lainnya dapat mengendalikan distribusi *trace elements*. Temuan tersebut menegaskan bahwa analisis biogeokimia merupakan pendekatan penting dalam mengevaluasi risiko pencemaran dan menetapkan strategi pengelolaan berbasis ekosistem.

Dalam perkembangannya, belum banyak penelitian yang secara khusus menganalisis kandungan *trace elements* ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni pada sedimen laut dalam di Selat Makassar dan Selat Lombok. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kandungan *trace element* tersebut dengan mempertimbangkan karakteristik biogeokimia seperti ukuran butir sedimen dan mengkaji pengaruh faktor ukuran butir sedimen terhadap distribusi horizontalnya. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan data ilmiah yang penting sebagai dasar pengelolaan lingkungan laut dan mitigasi pencemaran *trace elements* di wilayah tersebut.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yaitu:

1. Menganalisis sebaran horizontal konsentrasi *trace elements* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn dan ^{60}Ni) pada sedimen laut dalam di perairan Selat Makassar dan Selat Lombok.
2. Mengevaluasi tingkat kontaminasi dan potensi risiko lingkungan yang ditimbulkan oleh akumulasi *trace elements* pada sedimen laut dalam.

1.3 Manfaat Penelitian

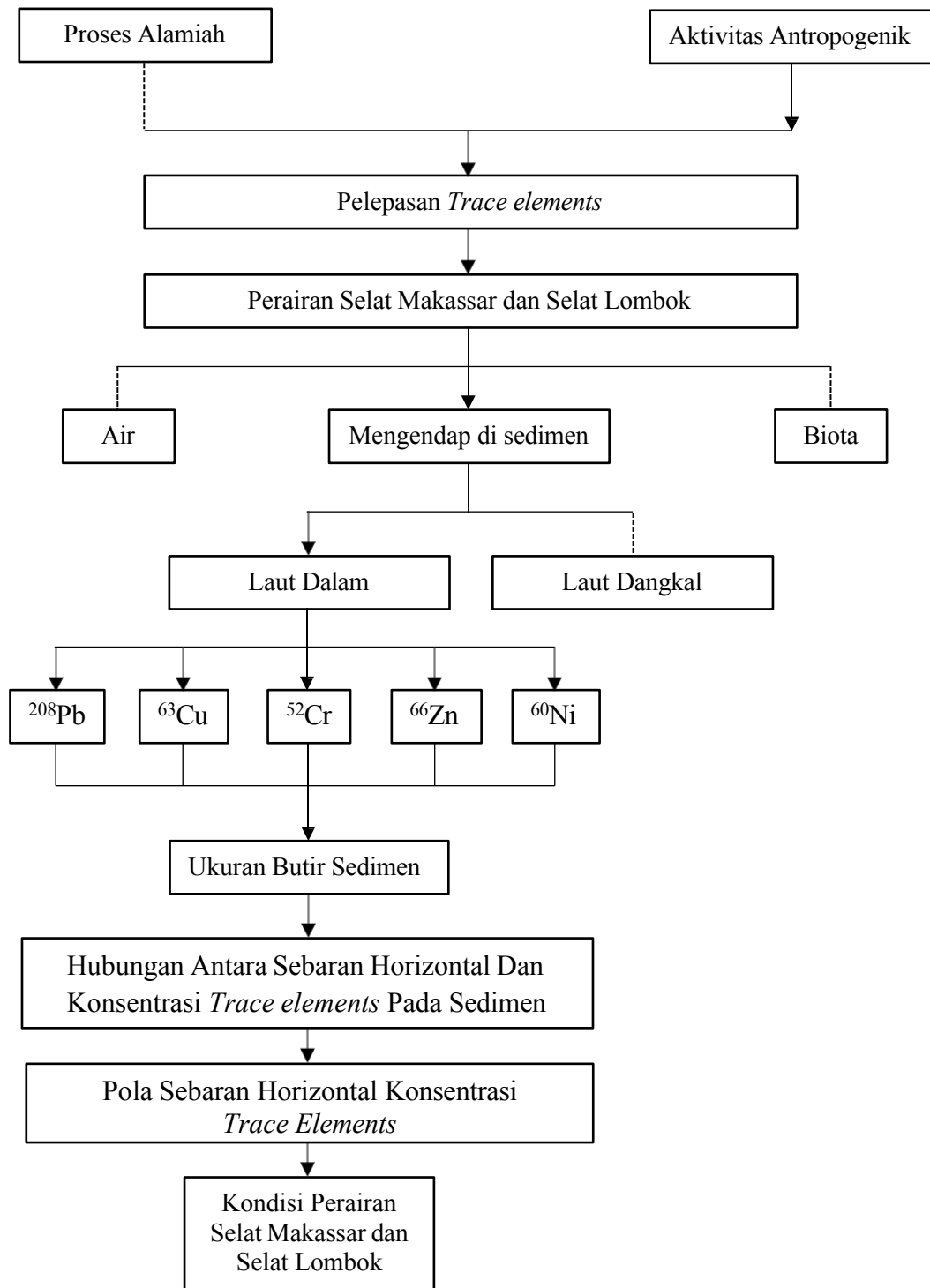
Penelitian diharapkan menghasilkan data konsentrasi dan sebaran horizontal *trace elements* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni) pada sedimen laut dalam berdasarkan karakteristik biogeokimia dan ukuran butir sedimen di Selat Makassar dan Selat Lombok. Informasi yang diperoleh dapat dimanfaatkan sebagai data pembandingan untuk pemantauan kualitas lingkungan laut, dasar pengelolaan pencemaran *trace elements*, penilaian risiko ekotoksikologis, serta upaya

perlindungan ekosistem laut dari dampak aktivitas antropogenik.

1.4 Kerangka Pikir

Wilayah laut dalam seperti Selat Makassar dan Selat Lombok merupakan jalur arus penting yang menghubungkan Samudera Pasifik dan Samudera Hindia (Rubin & Hesp, 2009), namun juga mengalami tekanan antropogenik tinggi dari pelayaran, industri pesisir, serta eksplorasi migas yang dapat memicu akumulasi *trace elements* seperti ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni pada sedimen (Bonanno & Pavone, 2015; Wuana & Okieimen, 2011). Pola sebaran horizontal *trace elements* di sedimen Selat Makassar dan Selat Lombok dipengaruhi oleh dinamika arus laut, perbedaan kondisi oseanografi antarwilayah, serta karakteristik fisik sedimen seperti ukuran butir yang berperan dalam proses transport, pengendapan, dan pengikatan *trace elements*, sehingga mengontrol variasi konsentrasi antar lokasi penelitian. (Sprintall *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2024).

Sedimen berfungsi sebagai *indicator* penting kualitas perairan karena mampu menyerap *trace elements* dalam jangka panjang (Eggleton & Thomas, 2004), yang masuk melalui limpasan daratan, rembesan industri, dan aktivitas maritim (Birch & Olmos, 2008). Untuk menganalisis pola distribusi spasial *trace elements* tersebut, sampel sedimen diambil dari berbagai kedalaman dan dianalisis kandungannya secara laboratorium, kemudian dipetakan menggunakan ODV dan ArcGIS. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam pemantauan dan pengelolaan lingkungan laut terhadap risiko pencemaran *trace elements*. Adapun kerangka pemikiran dalam penelitian ini disajikan dalam bentuk kerangka pikir pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Keadaan Umum Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada wilayah Selat Makassar dan Selat Lombok, dua wilayah penting dalam sistem sirkulasi laut regional dan global yang merupakan bagian dari jalur *Indonesian Throughflow* (ITF). Arus ITF membawa massa air hangat dan miskin nutrien dari Samudra Pasifik ke Samudra Hindia, sehingga Selat Makassar dan Selat Lombok berperan krusial dalam distribusi sifat oseanografi dan biogeokimia (Gordon, 2005; Rubin & Hesp, 2009). Selat Makassar adalah jalur utama ITF dengan arus dominan utara selatan yang cepat, terutama di bagian utara yang sempit, memengaruhi sedimentasi dan transportasi partikel tersuspensi (Susanto & Gordon, 2005). Kedalaman mencapai >2.000 meter memungkinkan akumulasi sedimen laut dalam yang relatif terisolasi. Selat Lombok, lebih sempit dan dangkal (1.300 m), juga penting dalam sirkulasi ITF (Bahmanpour, 2018; Bardin, 2014; Simon, 2014; Turekian & Imbrie, 1966). Berada di zona tektonik aktif, jenis sedimennya dipengaruhi oleh aktivitas geologi dan dinamika arus yang kompleks akibat pasang surut, topografi dasar laut, dan zona upwelling terdekat (Ffield & Gordon, 1996; Susanto *et al.*, 2007).

Secara biogeokimia, kedua wilayah menunjukkan variasi spasial *trace elements* dalam sedimen laut dalam yang bertindak sebagai penyimpan jangka panjang *trace elements* seperti ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni dari sumber alami dan antropogenik (Liu *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2016). Kandungan *trace elements* dipengaruhi oleh pH, redoks, bahan organik, dan ukuran butir (Rodushkin *et al.*, 1999; Reopanichkul *et al.*, 2009). Menurut Long *et al.*,

(1995), Keberadaan *trace elements* pada laut dipengaruhi oleh dinamika massa air dan proses geokimia dasar laut, seperti adsorpsi, presipitasi, dan interaksi dengan senyawa organik. Di Selat Makassar, *trace elements* cenderung lebih tinggi di bagian selatan akibat akumulasi endapan halus karena perlambatan arus (Susanto & Gordon, 2005). Di Selat Lombok, variasi *trace elements* lebih dipengaruhi oleh input lokal, seperti limpasan daratan dan aktivitas pelabuhan. Dengan demikian, pemahaman oseanografi dan biogeokimia di Selat Makassar dan Selat Lombok penting untuk menilai distribusi *trace elements* dan tingkat pencemaran *trace elements* di wilayah tropis dinamis seperti ALKI II.

2.2 Proses Biogeokimia

Proses biogeokimia *trace elements* di laut dalam melibatkan interaksi kompleks antara unsur kimia, partikel, dan organisme dalam lingkungan yang fisiknya stabil namun kimianya dinamis. Unsur seperti ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni mengalami *speciation* yang dipengaruhi oleh pH, Eh, suhu, dan ligan organik, membentuk bentuk larut, koloid, dan terikat partikel yang menentukan mobilitas nya (Bruland *et al.*, 1991; Gledhill & Buck, 2012). Dalam kondisi oksigen rendah laut dalam, ^{52}Cr cenderung berada dalam bentuk ^{52}Cr (III) yang tidak larut, sedangkan ^{60}Ni dan ^{66}Zn tetap dalam bentuk kompleks terlarut (Deverel *et al.*, 1990; Wu *et al.*, 2022). Meski perpindahan unsur ke sedimen lambat, adsorpsi oleh partikel halus dan agregat organik tetap signifikan, terutama di daerah dengan arus kuat seperti Selat Makassar (Nugraha *et al.*, 2020).

Di dasar laut, *trace elements* mengalami transformasi kimia dalam kondisi anoksik. Unsur seperti ^{208}Pb , ^{66}Zn , dan ^{63}Cu berikatan dengan senyawa sulfida membentuk padatan tidak larut (Calmano *et al.*, 1993; Morse & Luther, 1999). Bakteri pereduksi sulfat (SRB) berperan penting dalam pembentukan senyawa tersebut, sehingga sedimen laut dalam berfungsi sebagai reservoir *trace elements*. Namun, arus bawah laut atau gangguan tektonik dapat memicu pelepasan kembali unsur ke kolom air melalui *benthic flux* (Rabalais *et al.*, 2009). Laut dalam yang tampak stabil tetap rentan terhadap pengaruh iklim

dan dinamika arus seperti ITF yang dapat mempercepat redistribusi *trace elements* dari sedimen ke air laut (Middelburg & Levin, 2009).

Selain proses abiotik, transformasi biotik juga signifikan. Mikroorganisme dapat mengubah bentuk kimia unsur, misalnya metilasi Hg menjadi *MeHg*, yang sangat toksik dan mudah terakumulasi dalam rantai makanan (Benoit *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2024). Organisme laut dalam seperti plankton, bivalvia, dan ikan predator menyerap unsur *MeHg*, memicu bioakumulasi yang berisiko bagi manusia. Dengan demikian, pemahaman menyeluruh siklus biogeokimia *trace elements* di kolom air dan sedimen sangat penting untuk menilai potensi risiko ekotoksikologi di perairan dalam, seperti Selat Makassar dan Selat Lombok, yang merupakan jalur arus laut global utama (Borch *et al.*, 2010; Paul *et al.*, 2024).

2.3 Trace Elements Di Lingkungan Laut Dalam

Trace elements merupakan unsur mikro yang memainkan peran penting dalam sistem biogeokimia laut dalam, baik sebagai nutrisi esensial seperti ^{63}Cu , ^{66}Zn , dan ^{57}Fe maupun sebagai kontaminan toksik seperti ^{208}Pb , ^{52}Cr , ^{48}Cd , dan ^{60}Ni . Dalam lingkungan laut dalam yang ekstrem suhu rendah, tekanan tinggi, serta minim cahaya dan oksigen unsur-unsur esensial diperlukan oleh mikroorganisme untuk fungsi metabolik dan enzimatis, tetapi jika berlebihan dapat mengganggu kestabilan fisiologis organisme (Bruland *et al.*, 1991; Gledhill & Buck, 2012).

Unsur non-esensial bersifat toksik meskipun dalam konsentrasi rendah karena kecenderungannya terakumulasi secara perlahan dalam sedimen dan biota bentik (Förstner & Wittmann, 2012; Järup, 2003). Di laut dalam, *trace elements* mengalami *speciation* menjadi bentuk larut, koloid, atau terikat partikel, yang dipengaruhi oleh pH, Eh, dan keberadaan senyawa kompleks organik (Deverel *et al.*, 1990; Wu *et al.*, 2022). Interaksi dengan partikel halus memungkinkan terjadinya adsorpsi dan pengendapan ke dasar laut, di mana dalam kondisi anoksik unsur-unsur tersebut membentuk senyawa tidak larut, seperti *trace elements* sulfida melalui aktivitas mikroba pereduksi sulfat

(Calmano *et al.*, 1993; Morse & Luther, 1999). Sedimen laut dalam menjadi penyimpan utama *trace elements*, meskipun gangguan fisik seperti arus laut dalam dan aktivitas tektonik dapat menyebabkan remobilisasi unsur ke kolom air (Rabalais *et al.*, 2009).

Sumber masuknya *trace elements* tidak hanya berasal dari proses alami, seperti rembesan hidrotermal dan pelapukan kerak samudra, tetapi juga dari aktivitas antropogenik melalui akumulasi polutan global yang terbawa arus lintas samudra, seperti *Indonesian Throughflow* (ITF) yang melewati Selat Makassar dan Selat Lombok (Nugraha *et al.*, 2020; Paul *et al.*, 2024). Beberapa unsur, seperti Hg, dapat mengalami metilasi oleh mikroba menjadi *metilmerkuri* (*MeHg*), senyawa sangat toksik yang mudah masuk ke dalam rantai makanan melalui bioakumulasi pada plankton, invertebrata, dan ikan predator (Benoit *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2022). Proses bioakumulasi *MeHg* berpotensi menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia melalui konsumsi biota laut dalam, sehingga pemahaman terhadap dinamika, distribusi, dan dampak *trace elements* sangat penting dalam upaya mitigasi pencemaran serta perlindungan biodiversitas perairan laut dalam.

2.3.1 Pencemaran dan Toksisitas *Trace Elements*

Dalam kondisi ekstrem laut dalam suhu rendah, tekanan tinggi, serta minim cahaya dan oksigen unsur seperti ^{63}Cu , ^{66}Zn , dan ^{57}Fe diperlukan oleh mikroorganisme untuk fungsi metabolik dan enzimatis, namun kelebihan unsur tersebut dapat mengganggu fisiologi organisme (Bruland *et al.*, 1991; Gledhill & Buck, 2012). Unsur non-esensial, seperti ^{208}Pb , ^{52}Cr , ^{48}Cd , dan ^{60}Ni , bersifat toksik meski dalam kadar rendah karena akumulasi dalam sedimen dan biota bentik (Förstner & Wittmann, 2012; Järup, 2003). Di laut dalam, unsur-unsur tersebut mengalami *speciation* menjadi bentuk larut, koloid, atau terikat partikel, yang dipengaruhi oleh pH, Eh, dan senyawa organik kompleks (Deverel *et al.*, 1990; Wu *et al.*, 2022). Interaksi dengan partikel halus memungkinkan terjadinya adsorpsi dan pengendapan ke dasar laut, di mana dalam kondisi anoksik unsur-unsur tersebut membentuk senyawa *trace elements* sulfida tidak larut melalui aktivitas mikroba

pereduksi sulfat (Calmano *et al.*, 1993; Morse & Luther, 1999).

Sedimen laut dalam berfungsi sebagai penyimpan utama *trace elements*, tetapi tetap rentan terhadap remobilisasi akibat arus laut dalam atau aktivitas tektonik (Rabalais *et al.*, 2009). Unsur-unsur tersebut berasal dari sumber alami, seperti rembesan hidrotermal dan pelapukan kerak samudra, serta input antropogenik yang terbawa oleh arus lintas samudra, seperti *Indonesian Throughflow* (ITF) di Selat Makassar dan Selat Lombok (Nugraha *et al.*, 2020; Paul *et al.*, 2024). Beberapa unsur, seperti Hg, dapat mengalami metilasi oleh mikroba menjadi *metilmerkuri (MeHg)*, senyawa yang sangat toksik dan mudah terakumulasi dalam rantai makanan melalui plankton, invertebrata, dan ikan predator (Benoit *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2022). Proses tersebut dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia, sehingga kajian terhadap dinamika dan distribusi *trace elements* sangat penting untuk mitigasi pencemaran serta perlindungan biodiversitas laut dalam.

2.3.2 Karakteristik *Trace Elements*

Trace elements adalah unsur yang ditemukan dalam jumlah sangat kecil dalam lingkungan tetapi memiliki peran penting dalam proses biogeokimia dan ekologi. Berikut adalah karakteristik kimia, fisika, sumber, dan toksisitas dari beberapa *trace elements* yang relevan dalam penelitian:

2.3.2.1 Timbal (^{208}Pb)

Timbal (^{208}Pb), atau *plumbum* dalam bahasa Latin, adalah *trace element* golongan XIV, periode VI, dengan nomor atom 82 dan massa atom relatif 207,20 g/mol (Cotton & Wilkinson, 1989). Dikenal sebagai timah hitam, timbal memiliki titik leleh rendah, bersifat lunak, mudah ditempa, serta dapat membentuk paduan *trace elements* dengan sifat berbeda dari timbal murni (Darmono, 1995; Fardiaz, 1992). Dengan densitas tinggi (11,34 g/cm³), ^{208}Pb relatif stabil terhadap udara lembap, menjadikannya bahan pelindung industri. Secara luas digunakan dalam pembuatan baterai, peluru, solder, pelapis kabel, dan bahan kimia lainnya (Fardiaz, 1992; Yang *et al.*, 2020).

Timbal umumnya hadir dalam bentuk terlarut atau tersuspensi dengan kelarutan rendah, dipengaruhi oleh pH, kesadahan, alkalinitas, dan kadar oksigen (Effendi, 2003). Sumber pencemarannya utama berasal dari bahan bakar bertimbal, yang berdampak negatif pada ekosistem akuatik. Paparan terhadap timbal pada manusia dan hewan dapat terjadi melalui makanan, minuman, inhalasi, dan kulit, menyebabkan gangguan enzim biosintesis hemoglobin, anemia, kejang, muntah, depresi, serta kerusakan sistem saraf dan pencernaan (Darmono, 1995).

Di perairan, ligan anorganik seperti fosfat dan sulfida dapat membentuk senyawa tidak larut dengan Pb^{2+} , seperti $Pb_3(PO_4)_2$ dan PbS , sementara pada pH > 6 terbentuk $Pb(OH)^+$, dan $Pb(OH)_2$ mengendap pada pH ≥ 10 . Ligan organik dengan gugus S, N, dan O juga membentuk kompleks stabil, sedangkan partikel tersuspensi mengadsorpsi ion Pb^{2+} , menghasilkan bentuk partikulat dengan kapasitas adsorpsi hingga 15–83% dari total timbal terlarut (Antić-Mladenović *et al.*, 2017; Dzombak & Morel, 1991; Stumm & Morgan, 2013).

2.3.2.2 Tembaga (^{63}Cu)

Tembaga (^{63}Cu) adalah *trace element* esensial, bernomor atom 29 dan massa 63,546 g/mol, dikenal karena konduktivitas listrik dan panas tinggi serta sifatnya yang mudah ditempa (Cotton & Wilkinson, 1989). Stabil di udara kering namun mudah teroksidasi di udara lembap, ^{63}Cu banyak digunakan di industri kabel dan alat listrik (Fardiaz, 1992; Valdez Salas *et al.*, 2013).

^{63}Cu berasal dari buangan industri, cat kapal, pertanian, dan pelapukan batuan (Effendi, 2003; Stauber & Florence, 1987). Meski berperan sebagai kofaktor enzim, ^{63}Cu dalam konsentrasi tinggi bersifat toksik bagi biota, seperti ikan dan mikroalga, terutama dalam bentuk ion Cu^{2+} yang menurunkan fotosintesis (Moore & Ramamoorthy, 2012; Valdez Salas *et al.*, 2013). Toksisitas ^{63}Cu dipengaruhi oleh pH, salinitas, kesadahan, dan bahan organik terlarut (Effendi, 2003; Estournel *et al.*, 2012; WHO, 1972), dengan bentuk Cu^{2+} lebih dominan dan beracun pada pH rendah. Hansen *et al.* (2002) mencatat bahwa konsentrasi $>20 \mu g/L$ dapat merusak insang dan sistem saraf ikan

Oncorhynchus mykiss.

Unsur ^{63}Cu dapat terakumulasi dalam jaringan, berpindah antar tingkat trofik, serta menimbulkan dampak kronis pada hati dan ginjal manusia (WHO, 1972). Sedimen mampu menyerap hingga 70% ^{63}Cu terlarut, terutama di perairan yang kaya akan bahan organik (Moore & Ramamoorthy, 2012).

2.3.2.3 Kromium (^{52}Cr)

Kromium (Cr) merupakan unsur transisi golongan VI B dengan nomor atom 24 dan massa atom relatif 51,996 g/mol. Unsur kromium umumnya ditemukan dalam bentuk Cr (III) dan Cr (VI), dengan Cr (VI) yang bersifat lebih toksik, lebih mobile, serta karsinogenik (Buxton *et al.*, 2019; Shanker *et al.*, 2005). ^{52}Cr (III) merupakan unsur esensial bagi metabolisme, sedangkan Cr (VI) dapat merusak DNA melalui mekanisme stres oksidatif (Kimbrough *et al.*, 1999). ^{52}Cr Kromium banyak digunakan dalam industri penyamakan, pelapisan *trace elements*, tekstil, dan pigmen (Abadin *et al.*, 2012). Limbahnya dapat mencemari perairan. Di lingkungan perairan, ^{52}Cr mengalami reaksi redoks dan proses adsorpsi yang dipengaruhi oleh pH dan potensial redoks (Santana-Casiano & González-Dávila, 1992; Richard & Bourg, 1991). ^{52}Cr dapat terakumulasi dalam jaringan biota dan menimbulkan gangguan respirasi serta kerusakan sel (Bhat *et al.*, 2024; Sarkar *et al.*, 2005). Di sedimen, kromium berikatan dengan partikel dan berpotensi dilepaskan kembali ke lingkungan apabila terjadi perubahan kondisi lingkungan (Peng *et al.*, 2018). Dengan demikian, pemantauan ^{52}Cr (VI) penting untuk menilai risiko ekologis di laut dalam (Sundaray *et al.*, 2009).

2.3.2.4 Seng (^{66}Zn)

Zinc (^{66}Zn) adalah *trace element* esensial dengan nomor atom 30 dan massa 65,38 g/mol, berperan sebagai kofaktor enzim dalam metabolisme, namun bersifat toksik pada konsentrasi tinggi (Maret & Sandstead, 2006; Plum *et al.*, 2010). Paparan berlebih dapat merusak jaringan dan mengganggu fisiologi biota, seperti ikan dan invertebrata (Rand & Petrocelli, 1984).

^{66}Zn umumnya hadir sebagai ion Zn^{2+} yang mudah larut dan mobil, dengan kelarutan dipengaruhi oleh pH, suhu, dan bahan organik (Luoma, 2018). Unsur ini juga membentuk kompleks yang menentukan toksisitas dan bioavailabilitasnya (Di Toro *et al.*, 2001), serta teradsorpsi ke partikel dan sedimen yang memengaruhi distribusinya (Bradl, 2004). Konsentrasi tinggi ^{66}Zn dapat mengganggu osmoregulasi, aktivitas enzim, dan reproduksi, hingga menyebabkan kematian (Hogstrand *et al.*, 1996; WHO, 1972). Organisasi Kesehatan Dunia (*WHO*) menetapkan batas aman ^{66}Zn dalam air minum sebagai acuan perlindungan kesehatan manusia dan ekosistem.

2.3.2.5 Nikel(^{60}Ni)

Nikel (^{60}Ni) adalah *trace elements* transisi dengan nomor atom 28, dan nomor massa 58,69 g/mol yang secara alami terdapat sebagai padatan atau senyawa kompleks dan esensial dalam jumlah kecil (Alloway, 2012). Secara industri, nikel (Ni) banyak digunakan dalam pembuatan baja tahan karat, baterai, dan pelapisan *trace elements* karena ketahanan terhadap korosi serta sifat magnetiknya (Barceloux & Barceloux, 1999; Waalkes, 2003). Di perairan, Ni berasal dari aktivitas industri, pertambangan, dan deposisi atmosfer (Das *et al.*, 2008), serta umumnya hadir sebagai ion Ni^{2+} yang dapat membentuk kompleks dengan senyawa anorganik maupun organik (American Public Health Association, 1926). ^{60}Ni dapat terakumulasi pada ikan dan moluska (Nieboer & Nriagu, 1992), serta teradsorpsi pada sedimen, namun berpotensi dilepaskan kembali ke kolom air apabila terjadi perubahan kondisi redoks (Förstner & Wittmann, 2012). Paparan ^{60}Ni dalam konsentrasi tinggi dapat menimbulkan dampak toksik terhadap biota dan manusia (IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 1990; Zhang *et al.*, 2024). Pemantauan ^{60}Ni di lingkungan laut dalam, seperti Selat Makassar dan Selat Lombok, menjadi penting mengingat mobilitasnya dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik dan dinamika laut (Masiol *et al.*, 2014).

2.4 Dampak *Trace Elements* Terhadap Lingkungan dan Makhluk Hidup

Trace elements penting bagi sistem biologis laut, namun dalam bentuk bioaktif dan konsentrasi tinggi dapat menimbulkan dampak ekologis serius. Pada ikan, *trace elements* masuk melalui insang atau saluran pencernaan dari sedimen dan makanan tercemar (Burger & Gochfeld, 2005; Jezierska & Witeska, 2006; Søfteland, 2010). Unsur esensial seperti ^{63}Cu dan ^{66}Zn dibutuhkan tubuh, tetapi dalam jumlah berlebih dapat menyebabkan stres oksidatif, gangguan enzim, dan penurunan fungsi reproduksi (Martins *et al.*, 2017). *Trace elements* toksik seperti ^{208}Pb , Hg, dan Cd dapat merusak organ vital jika terakumulasi secara kronis (Förstner & Wittmann, 2012; Järup, 2003). Untuk menetralkan toksisitas, *trace elements* berikatan dengan protein pengikat seperti *metallothionein*, namun ketika kapasitas pengikatan terlampaui, dapat terjadi kerusakan biokimia maupun fisiologis (Martins *et al.*, 2017).

Trace elements seperti Hg dan ^{208}Pb memiliki afinitas tinggi terhadap jaringan lunak dan cenderung menumpuk di hati, ginjal, serta otot, serta meningkatkan kadarnya melalui biomagnifikasi hingga mencapai manusia sebagai konsumen puncak (Bjørklund *et al.*, 2017). Bentuk kimia *trace elements* turut menentukan tingkat toksisitasnya, seperti *metilmerkuri* yang sangat berbahaya karena mampu menembus sawar darah otak dan plasenta (Clarkson *et al.*, 2003), atau ^{208}Pb yang dapat menurunkan fungsi kognitif pada anak (Bjørklund *et al.*, 2017). Dengan demikian, pemantauan rutin terhadap *trace elements* di air, sedimen, dan biota laut sangat penting, terutama di wilayah dengan arus laut yang kompleks seperti Selat Makassar dan Selat Lombok, yang rentan terhadap kontaminasi (Middelburg & Levin, 2009; Søfteland, 2010).

Dalam skala regional, sejumlah penelitian di Indonesia menunjukkan adanya variasi konsentrasi *trace elements* pada sedimen sesuai dengan tingkat aktivitas manusia di sekitarnya. Wilayah dengan aktivitas pertambangan, seperti Teluk Kelabat, Pulau Bangka, atau pelabuhan dan industri seperti Teluk Jakarta, Gresik, dan Makassar, cenderung memiliki konsentrasi *trace elements* yang lebih tinggi dibandingkan wilayah dengan tekanan antropogenik rendah, misalnya Perairan Cimanuk atau Pulau Maspari. Hal tersebut menunjukkan

adanya hubungan erat antara aktivitas manusia dengan akumulasi *trace elements* pada sedimen.

Sementara dalam skala global, penelitian di berbagai negara memperlihatkan pola yang beragam. Perairan di dekat kawasan industri besar, seperti Laut Ionia di Italia Selatan, Pantai Sfax di Tunisia, atau Teluk Tokyo di Jepang, memperlihatkan konsentrasi *trace elements* yang relatif tinggi. Sebaliknya, beberapa wilayah yang lebih jauh dari sumber pencemar atau didominasi oleh sedimen kasar, seperti Arabian Gulf atau Laut Merah bagian utara, menunjukkan konsentrasi yang lebih rendah. Perbandingan tersebut menegaskan bahwa kondisi geologi dan intensitas aktivitas manusia merupakan faktor penentu utama dalam distribusi *trace elements*.

Penyajian data pembandingan dari berbagai wilayah regional maupun global menjadi penting untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif. Data tersebut tidak hanya menjadi tolok ukur dalam menilai apakah konsentrasi *trace elements* di lokasi penelitian masih berada dalam kisaran alami (*background level*) atau sudah meningkat akibat aktivitas antropogenik, tetapi juga bermanfaat untuk memahami variasi spasial antar wilayah. Perbandingan konsentrasi *trace elements* pada sedimen di wilayah global dan regional disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Referensi konsentrasi *trace elements* di wilayah perairan global & regional

Lokasi	Tipe Lokasi	Konsentrasi (mg/kg, ppm)					Referensi
		²⁰⁸ Pb	⁶³ Cu	⁶⁶ Zn	⁵² Cr	⁶⁰ Ni	
Muara Sungai Porong	Estuari	0,1	0,4	0,6	-	-	Harlyan <i>et al.</i> , 2015
Perairan Kota Makassar	Estuari	9,1–11,7	9,3–48,5	22,5–177,0	0,0–26,7	-	Polapa <i>et al.</i> , 2022
Teluk Kelabat, Pulau Bangka	Estuari	16,9	4,4	72	-	-	Nugraha <i>et al.</i> , 2019
Perairan Cimanuk	Estuari	0,02	0,01	0,02	-	0,03	Harmesa <i>et al.</i> , 2020
Teluk Jakarta	Pesisir	38,5	33,1	109	-	-	Kusuma <i>et al.</i> , 2015
Perairan pesisir Gresik, Jawa Timur	Pesisir	0,6	85,5	133	-	-	Lestari & Budiyanoto, 2013

Tabel 1. Referensi konsentrasi *trace elements* di wilayah perairan global & regional (lanjutan)

Lokasi	Tipe Lokasi	Konsentrasi (mg/kg, ppm)					Referensi
		²⁰⁸ Pb	⁶³ Cu	⁶⁶ Zn	⁵² Cr	⁶⁰ Ni	
Pulau Maspari	Pesisir	0,03	0,02	0,51	-	0,1	Putri <i>et al.</i> , 2025
Qizhou Island	Estuari	21	11,3	55,4	34,4	21,6	Fan <i>et al.</i> , 2020
Teluk San Francisco	Estuari	5,2	23,7	78	-	-	Hornberger <i>et al.</i> , 1999
Pantai Sfax, Tunisia	Pesisir	32	16	58,9	45,5	13,5	Gargouri <i>et al.</i> , 2011
Mallorca Island	Pesisir	10,1	1,2	8,9	8,8	1,7	Ardila <i>et al.</i> , 2023
Arabian Gulf	Laut Lepas	1,4	5,7	13,1	22	15,5	Elobaid <i>et al.</i> , 2025
Laut Ionia, Italia Selatan	Laut Lepas	57,8	47,4	102,3	85,9	53,3	Buccolieri <i>et al.</i> , 2006
Rata-rata Global	Laut Lepas	20	25	71	35	20	Rudnick & Gao, 2014

Berdasarkan data konsentrasi pada Tabel 1, terlihat bahwa konsentrasi *trace elements* pada sedimen menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar wilayah, baik dalam skala regional maupun global. Secara umum, wilayah dengan intensitas aktivitas antropogenik yang tinggi menunjukkan konsentrasi *trace elements* yang lebih besar dibandingkan wilayah yang relatif minim aktivitas manusia.

Di tingkat regional, beberapa lokasi di Indonesia memperlihatkan variasi konsentrasi *trace elements* yang cukup lebar. Menurut Polapa *et al.*, (2022), konsentrasi ²⁰⁸Pb, ⁶³Cu, dan ⁶⁶Zn di Perairan Kota Makassar masing-masing berkisar antara 9,1–11,7 mg/kg (ppm), 9,3–48,5 mg/kg (ppm), dan 22,5–177,0 mg/kg (ppm), dengan nilai ⁵²Cr mencapai 26,7 mg/kg (ppm). Nilai tersebut relatif tinggi dibandingkan dengan wilayah estuari lain, seperti Muara Sungai Porong, yang menurut Harlyan *et al.*, (2015) hanya menunjukkan kandungan ²⁰⁸Pb sebesar 0,1 mg/kg (ppm), ⁶³Cu 0,4 mg/kg (ppm), dan ⁶⁶Zn 0,6 mg/kg (ppm). Di Teluk Kelabat, Pulau Bangka, penelitian Nugraha *et al.*, (2019) mencatat konsentrasi ²⁰⁸Pb sebesar 16,9 mg/kg (ppm), ⁶³Cu 4,4 mg/kg (ppm), dan ⁶⁶Zn 72 mg/kg (ppm), yang diduga berasal dari aktivitas pertambangan timah di sekitarnya.

Selain wilayah penelitian, kawasan dengan aktivitas industri dan pelabuhan yang padat, seperti Teluk Jakarta dan perairan Gresik, juga memperlihatkan konsentrasi *trace elements* yang tinggi. Kusuma *et al.*, (2015) melaporkan konsentrasi ^{208}Pb sebesar 38,5 mg/kg (ppm), ^{63}Cu sebesar 33,1 mg/kg (ppm), dan ^{66}Zn sebesar 109 mg/kg (ppm) pada sedimen di Teluk Jakarta, sementara Lestari & Budiyo (2013) menemukan kadar ^{63}Cu dan ^{66}Zn masing-masing mencapai 85,5 mg/kg (ppm) dan 133 mg/kg (ppm) pada sedimen perairan pesisir Gresik. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan adanya pengaruh nyata aktivitas industri, pelayaran, serta limpasan limbah domestik terhadap peningkatan akumulasi *trace elements* di sedimen pesisir Indonesia.

Pada skala global, pola serupa juga tampak di beberapa kawasan pesisir yang berdekatan dengan pusat aktivitas industri besar. Buccolieri *et al.*, (2006) melaporkan bahwa di Laut Ionia, Italia Selatan, konsentrasi ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni masing-masing mencapai 57,8 mg/kg (ppm), 47,4 mg/kg (ppm), 102,3 mg/kg (ppm), 85,9 mg/kg (ppm), dan 53,3 mg/kg (ppm). Sementara Gargouri *et al.*, (2011) di Pantai Sfax, Tunisia, menemukan bahwa kandungan ^{208}Pb , ^{63}Cu , dan ^{66}Zn masing-masing sebesar 32 mg/kg (ppm), 16 mg/kg (ppm), dan 58,9 mg/kg (ppm). Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa kawasan dengan tingkat aktivitas antropogenik yang tinggi memiliki potensi akumulasi *trace elements* yang lebih besar dibandingkan dengan wilayah yang relatif alami.

Sebaliknya, lokasi yang lebih jauh dari sumber pencemar, seperti Arabian Gulf, menunjukkan konsentrasi *trace elements* yang relatif rendah. Berdasarkan hasil penelitian Elobaid *et al.*, (2025), kandungan ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni di wilayah tersebut hanya berkisar antara 1,4–22 mg/kg (ppm), mencerminkan pengaruh antropogenik yang minimal serta karakteristik sedimen yang lebih kasar. Perbandingan antara wilayah regional dan global tersebut menegaskan bahwa tingkat aktivitas manusia merupakan faktor utama yang memengaruhi variasi dan akumulasi *trace elements* dalam sedimen laut, di samping faktor alami seperti kondisi geologi, ukuran butir sedimen, dan dinamika arus perairan (Förstner & Wittmann, 2012; Søfteland, 2010).

2.5 Peralatan dan Perangkat Lunak Penunjang Penelitian

2.5.1 *Ocean Data View (ODV)* dan ArcGIS

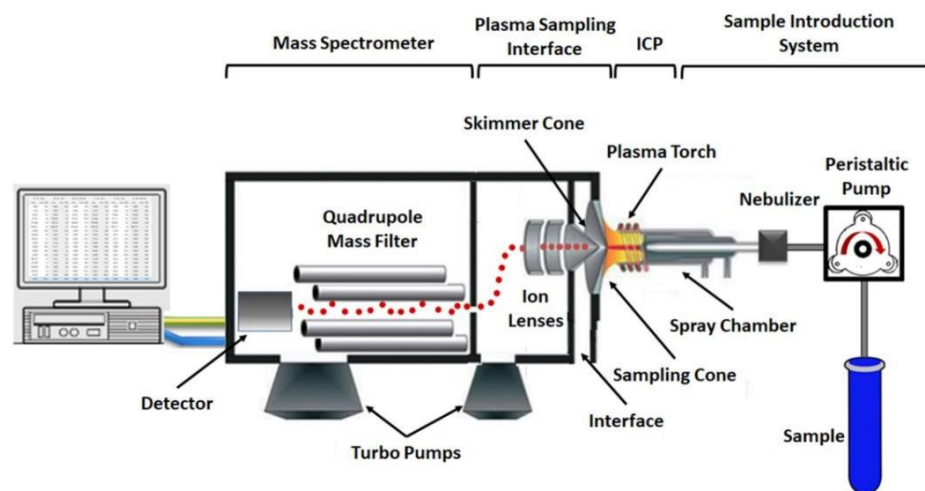
Ocean Data View (ODV) adalah perangkat lunak analisis data oseanografi yang banyak digunakan untuk visualisasi grafik vertikal, distribusi horizontal, dan peta kontur antarparameter, serta mendukung interpolasi DIVA untuk analisis spasial presisi (Schlitzer, 2015; Troupin *et al.*, 2012). ODV efektif dalam mengolah data lingkungan seperti suhu, salinitas, oksigen, dan *trace elements* (Groom *et al.*, 2019), serta dalam penelitian juga digunakan untuk memetakan sebaran vertikal dan horizontal ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni yang terkait proses biogeokimia laut dalam. ArcGIS, perangkat SIG dari ESRI, digunakan untuk menyusun peta distribusi *trace elements* dan menganalisis hubungan spasial antara konsentrasi unsur dengan lokasi sampel di Selat Makassar dan Selat Lombok, serta memungkinkan integrasi data oseanografi, geologi, dan kimia sedimen untuk visualisasi lingkungan yang akurat (Dick, 2016).

2.5.2 *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)*

Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS) merupakan teknik analisis yang andal untuk menentukan komposisi multielemen secara kualitatif, konsentrasi unsur secara kuantitatif, serta kelimpahan isotop pada berbagai matriks, seperti sedimen, air, dan biota. Teknik tersebut memiliki sensitivitas tinggi, batas deteksi sangat rendah, serta kemampuan menganalisis banyak unsur secara simultan, sehingga широко digunakan dalam penelitian lingkungan, geokimia, dan pencemaran *trace elements*.

Secara umum, instrumen ICP-MS terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sistem introduksi sampel yang mengubah sampel cair menjadi aerosol, sumber ion *Inductively Coupled Plasma (ICP)* untuk mengionisasi unsur pada suhu sangat tinggi, lensa elektrostatik untuk memfokuskan ion, antarmuka penghubung plasma dengan ruang vakum, spektrometer massa yang memisahkan ion berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z), serta detektor yang merekam intensitas ion sebagai sinyal analitik. Skema komponen utama

instrumen ICP-MS disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema *inductively coupled plasma-mass Spectrometry* (ICP-MS)

Sumber: Mazarakioti *et al.*, 2022

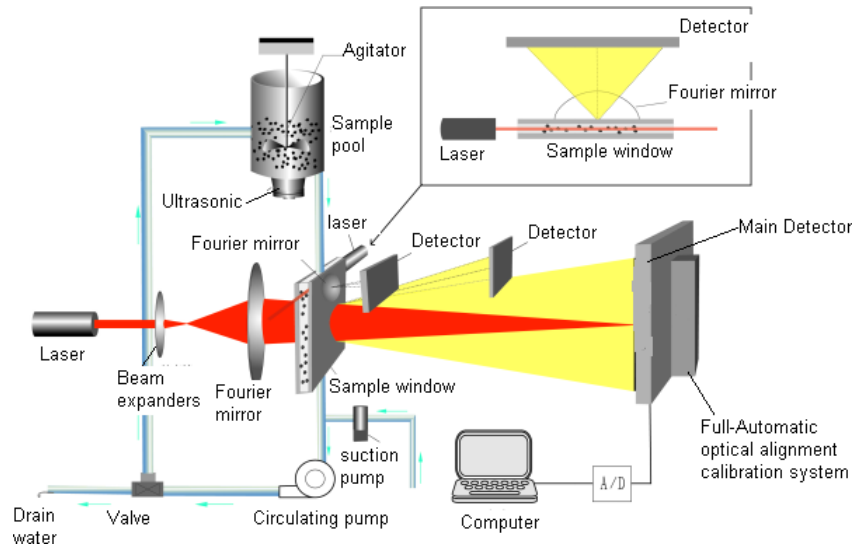
Dalam analisis kimia lingkungan, khususnya pada penelitian *trace elements* dalam sedimen laut, tahap persiapan sampel merupakan langkah awal yang penting sebelum analisis dilakukan. Proses tersebut meliputi pencucian, pengeringan seperti melalui liofilisasi, penghalusan, ekstraksi, dan homogenisasi, tergantung pada kondisi fisik sampel. Umumnya, pencernaan dilakukan secara termal dalam kondisi asam menggunakan HNO_3 , $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, HNO_3/HCl , atau HNO_3/HF (da Silva *et al.*, 2020). Metode yang paling umum digunakan adalah pencernaan dengan HNO_3 pekat (65-70%) menggunakan oven *microwave*, kemudian hasilnya diencerkan dengan air ultrapurni (da Silva *et al.*, 2020). Tahap tersebut bertujuan untuk memecah matriks sedimen dan melepaskan *trace elements* seperti ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{52}Cr , ^{66}Zn , dan ^{60}Ni agar dapat dianalisis lebih lanjut.

Teknik *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS) bekerja optimal untuk sampel dalam bentuk cair, sehingga larutan hasil pencernaan dialirkan ke sistem nebulisasi untuk membentuk aerosol yang dicampur dengan gas argon (Ar) (Bulska & Wagner, 2016). Aerosol halus kemudian masuk ke plasma argon bersuhu tinggi, di mana terjadi proses penguapan, atomisasi, dan ionisasi (Pupyshev & Semenova, 2001). Ion positif yang ter-

bentuk diteruskan melalui sistem antarmuka menuju penganalisis massa, biasanya tipe kuadropol, yang memisahkan ion berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z) (Miller & Denton, 1986; Wilschefski & Baxter, 2019). Detektor kemudian mengubah sinyal ion menjadi pulsa listrik dalam satuan *counts per second* (CPS), yang dikonversi menjadi konsentrasi unsur melalui kurva kalibrasi. Dengan sensitivitas tinggi dan batas deteksi hingga tingkat ng/L *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS) menjadi metode yang efektif untuk menganalisis *trace elements* dalam sedimen laut, termasuk di wilayah Selat Makassar dan Selat Lombok.

2.5.3 *Particle Size Analyzer* (PSA)

Particle Size Analyzer (PSA) merupakan teknik analisis ukuran partikel yang mulai dikembangkan sejak tahun 1970 (Agrawal *et al.*, 2010). Metode *Particle Size Analyzer* (PSA) sekarang menjadi prosedur pengujian standar yang telah diakui dalam ASTM B822-20 dan ISO 13322-1:2014. Dalam penelitian *trace elements*, digunakan instrumen *Particle Size Analyzer* Beckman-Coulter LS13-320 dengan modul cairan berair (*Aqueous Liquid Module* / ALM). Prinsip kerja PSA didasarkan pada pola difraksi cahaya laser untuk mengukur distribusi ukuran partikel (*Particle Size Distribution* / PSD) dari serbuk lepas. Partikel dengan ukuran tertentu akan mendifraksi cahaya pada sudut tertentu, di mana sudut difraksi berbanding terbalik dengan diameter partikel (Di Stefano *et al.*, 2010). Analisis menggunakan PSA memungkinkan karakterisasi komposisi partikel yang lebih detail, termasuk fraksi halus dan kasar. Hasil pengukuran distribusi ukuran partikel ini sangat penting untuk memahami kapasitas sedimentasi, adsorpsi unsur, serta interaksi fisik-kimia partikel dalam lingkungan perairan. Skema sistem *Particle Size Analyzer* (PSA) dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema *particle size analyzer* (PSA)

Sumber: Ballard & Beare, 2013

Dalam proses pengukuran distribusi ukuran partikel, berkas cahaya monokromatik dengan panjang gelombang $750\ \mu\text{m}$ difokuskan secara optik menggunakan sistem Fourier, kemudian dilewatkan melalui sel sampel. Cahaya yang terdifraksi akan difokuskan ke susunan 126 detektor fotodioda yang terletak pada sudut sekitar 35° terhadap sumbu optik. Instrumen tersebut dapat mengukur ukuran partikel tersuspensi dengan rentang diameter ekuivalen bola antara $0,4\ \mu\text{m}$ hingga $2000\ \mu\text{m}$, berdasarkan teori difraksi Fraunhofer. Pada prinsipnya, diasumsikan bahwa semua partikel berbentuk bola dan orientasi partikel tidak diperhitungkan dalam perhitungan ukuran (Blott & Pye, 2012; Boer *et al.*, 1987). *Particle Size Analyzer* (PSA) merupakan metode analisis yang cepat sekitar 5-10 menit per sampel, tidak merusak, serta memungkinkan sampel untuk digunakan kembali setelah analisis. Biasanya, metode tersebut hanya memerlukan kurang dari 10 gram bahan sampel untuk setiap pengukuran. Selain aspek tersebut, ukuran partikel dapat diklasifikasikan berdasarkan publikasi Long *et al.*, (1995) yang dikembangkan oleh Blott dan Pye, (2012), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Klasifikasi ukuran partikel menurut (Blott & Pye, 2012; Long *et al.*, 1995)

Kelas Ukuran Partikel	Rentang Ukuran (μm)
<i>Very fine clay</i>	0,063 - 0,125
<i>Fine clay</i>	0,125 - 0,25
<i>Medium clay</i>	0,25 - 0,5
<i>Coarse clay</i>	0,5 - 1
<i>Very coarse clay</i>	1 - 2
<i>Very fine silt</i>	2-4
<i>Fine silt</i>	>4

Tabel 2 menyajikan klasifikasi ukuran partikel sedimen untuk fraksi *clay* dan *silt* berdasarkan diameter partikel dalam satuan mikrometer (μm). Penggunaan satuan μm dipilih karena sesuai dengan keluaran utama *Particle Size Analyzer* (PSA) dan umum digunakan dalam kajian sedimen laut. Klasifikasi tersebut digunakan untuk membedakan fraksi sedimen halus, mulai dari *very fine clay* hingga *fine silt*, sehingga distribusi ukuran butir dapat dianalisis secara lebih sistematis. Informasi ukuran partikel menjadi aspek penting dalam kajian *trace elements* karena fraksi sedimen yang lebih halus memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar, sehingga berperan dominan dalam proses adsorpsi dan akumulasi *trace elements*.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

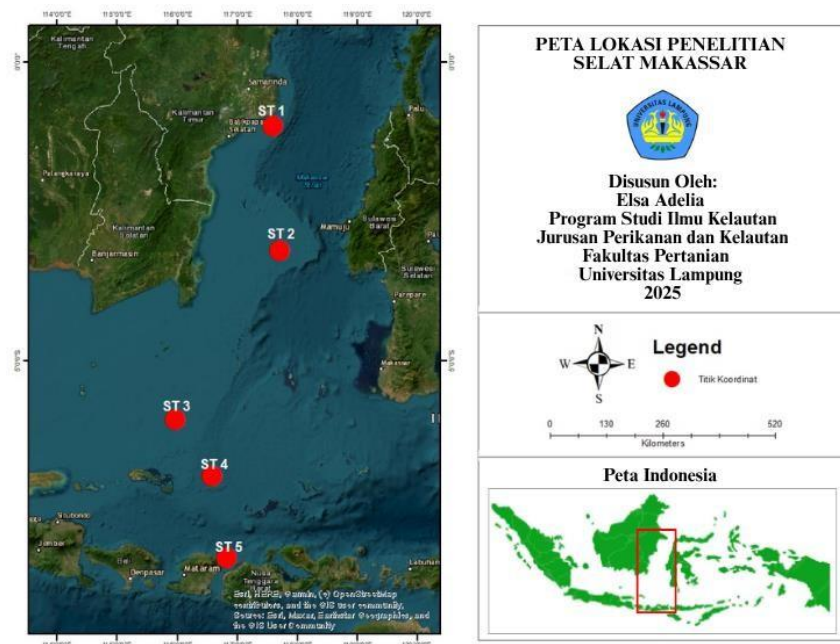
Waktu dan tempat penelitian mencakup periode pelaksanaan penelitian, waktu pengambilan sampel sedimen, serta lokasi analisis laboratorium yaitu:

3.1.1 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari hingga Juli 2025. Sementara, pengambilan sampel sedimen dilakukan pada bulan September 2024 di perairan Selat Makassar dan Selat Lombok.

3.1.2 Tempat Penelitian

Pengambilan sampel sedimen dilakukan di perairan Selat Makassar dan Selat Lombok. Analisis konsentrasi trace elements yang meliputi ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni dilaksanakan di Laboratorium Radiomarine Kelautan, Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir – Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTKMMN–ORTN–BRIN) yang berlokasi di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) B. J. Habibie, Jalan Cisit, Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. Peta lokasi pengambilan sampel di perairan Selat Makassar dan Selat Lombok disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta lokasi penelitian

3.2 Karakteristik Lokasi Pengambilan Sampel

Lokasi pengambilan sampel sedimen ditentukan berdasarkan variasi kondisi oseanografi, geomorfologi dasar laut, dan aktivitas manusia di sekitar wilayah penelitian. Setiap stasiun mewakili karakteristik lingkungan yang berbeda di sepanjang lintasan Selat Makassar hingga Selat Lombok. Secara rinci, deskripsi lokasi masing-masing stasiun ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik lokasi penelitian

Lokasi	Longitude (°E)	Latitude (°S)	Karakteristik Lokasi
ST.1	117.61	-1.0823	Berada di sekitar delta Mahakam dan muara sungai besar yang membawa limpasan sedimen dari daratan Kalimantan Timur dengan pengambilan sampel kedalaman 58,8 meter.
ST.2	116.2709	-7.5101	Stasiun 2 berada di bagian utara Selat Makassar, dengan lokasi pelabuhan Cumi-Cumi yang terletak di sebelah timur area penelitian.

Tabel 3. Karakteristik lokasi penelitian (lanjutan)

Lokasi	Longitude (°E)	Latitude (°S)	Karakteristik Lokasi
ST.3	116.9136	-6.0779	Wilayah tersebut tergolong padat aktivitas pelayaran dan industri perikanan, sehingga berpotensi menerima masukan <i>trace elements</i> dari kegiatan pelabuhan serta aliran arus utara-selatan Arlindo dengan kedalaman pengambilan sampel sedimen yaitu 56,3 meter. Berada di timur laut Pulau Kangean, wilayah perairan transisi antara Selat Makassar dan Laut Jawa. Lokasi stasiun 3 memiliki dinamika arus yang kompleks dengan dominasi sedimen halus dari suspensi laut dalam, kedalaman pengambilan sampel sedimen yaitu 87 meter.
ST.4	114.9342	-7.9654	Terletak di timur Pulau Kangean, daerah laut dalam yang relatif tenang dan minim aktivitas antropogenik. Sedimen di area lokasi penelitian diduga lebih dipengaruhi oleh proses alami seperti pengendapan partikel dari kolom air dan arus bawah laut, sampel sedimen di ambil pada kedalaman 398,7 meter.
ST.5	115.9743	-5.9915	Berada di Selat Alas, yang menghubungkan Laut Jawa dan Samudra Hindia. Wilayah selat alas memiliki karakteristik oseanografi yang dinamis, dengan arus kuat dan percampuran massa air laut dari dua samudra utama dengan sampel sediment yang di ambil pada kedalaman 435,8 meter.

Perbedaan karakteristik setiap stasiun diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai variasi distribusi *trace elements* pada sedimen laut dalam di sepanjang lintasan Arus Lintas Indonesia (Arlindo).

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan selama penelitian disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Alat

No.	Alat	Spesifikasi	Deskripsi
1.	Kapal Riset <i>Geomarine 3</i>	Dilengkapi sistem navigasi dan peralatan oseanografi	Digunakan untuk pelayaran dan pengambilan sampel sedimen laut dalam.
2.	Ekman Grab	Stainless steel, kapasitas $\pm 1-2$ L	Untuk mengambil sampel sedimen dari dasar laut di lokasi penelitian.
3.	Botol Sampel	<i>Polyethylene</i> (PE), volume 1 L	Untuk penyimpanan sementara sampel saat di lapangan.
4.	Saringan (<i>Sieve</i>)	Mesh size 63 μm	Memisahkan fraksi sedimen halus ($< 63 \mu\text{m}$) yang digunakan untuk analisis.
5.	Oven Pengering	Suhu maksimum 80°C	Mengeringkan sedimen sebelum dianalisis di laboratorium.
6.	Timbangan Analitik	Ketelitian hingga 0,0001 gram	Menimbang sedimen kering dengan akurasi tinggi.
7.	Mortar dan Lumpang	Material porselen	Menghaluskan sedimen kering menjadi bubuk halus.
8.	ICP-MS (<i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>)	Resolusi tinggi untuk analisis <i>trace elements</i>	Digunakan untuk menganalisis konsentrasi <i>trace elements</i> (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni).
9.	PSA (<i>Particle Size Analyzer</i>)	<i>Analyzer</i> ukuran partikel berbasis laser atau metode hidrometer	Digunakan untuk menganalisis distribusi ukuran butir sedimen yang diambil dari lokasi penelitian.
10.	Peralatan Gelas Laboratorium	Beaker, labu ukur, pipet tetes, pipet volume, corong	Untuk persiapan dan pelarutan sampel selama proses analisis.

Tabel 4. Alat (lanjutan)

No.	Alat	Spesifikasi	Deskripsi
11.	Alat Pelindung Diri (APD)	Jas laboratorium, masker, sarung tangan	Melindungi peneliti selama bekerja di laboratorium dan lapangan.

Tabel 5. Bahan

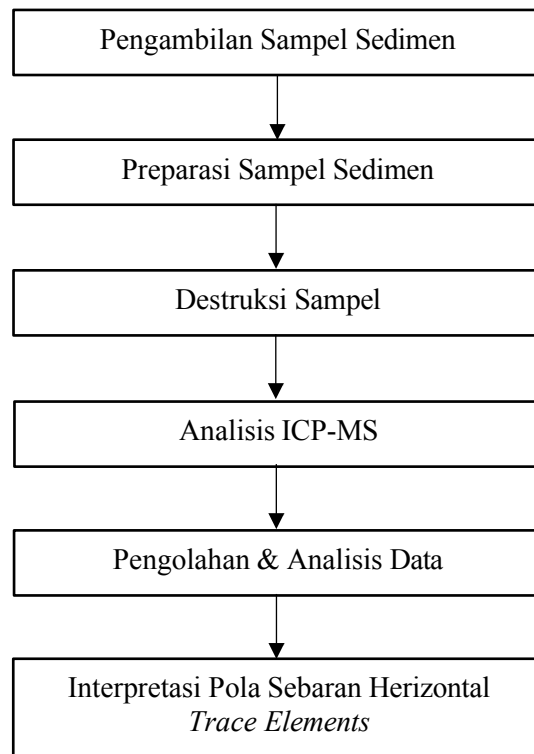
No.	Bahan	Spesifikasi	Deskripsi
1.	Asam Nitrat (HNO ₃)	Pro Analisis (PA), 65%	Digunakan untuk melarutkan sedimen dalam proses destruksi sampel.
2.	Asam Klorida (HCl)	Pro Analisis (PA), 37%	Digunakan bersama HNO ₃ untuk pelarutan <i>trace elements</i> dari sedimen.
3.	Hidrogen Peroksida (H ₂ O ₂)	30%, Pro Analisis	Mengoksidasi bahan organik dalam sedimen saat destruksi.
4.	Akuades	Demineralisasi atau ultrapure	Sebagai pelarut dan pembilas peralatan sebelum analisis.
5.	Larutan standar (²⁰⁸ Pb, ⁶³ Cu, ⁶⁶ Zn, ⁵² Cr, ⁶⁰ Ni)	Konsentrasi tertentu (1000 ppm)	Sebagai standar kalibrasi alat ICP-MS untuk penentuan kadar <i>trace elements</i> .
6.	Kertas saring	<i>Pore size</i> halus (Whatman no. 42 atau setara)	Untuk menyaring larutan hasil destruksi sebelum dianalisis.

3.4 Prosedur Penelitian

Sampel sedimen diambil menggunakan Kapal Riset *Geomarine 3* di perairan laut dalam Selat Makassar dan Selat Lombok. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan ekan grab dari kedalaman 200 hingga 1000 meter di bawah permukaan laut, menyesuaikan dengan morfologi dasar laut di setiap lokasi. Lokasi pengambilan ditentukan dengan bantuan GPS, dan masing-masing titik pengambilan dilakukan dalam beberapa replikasi untuk memastikan representatif.

Sampel sedimen yang diperoleh dimasukkan ke dalam botol *polyethylene* (PE), diberi label sesuai koordinat lokasi, dan disimpan dalam box pendingin. Sampel kemudian dibawa ke laboratorium untuk dilakukan tahapan preparasi, destruksi, dan analisis kandungan *trace elements* (²⁰⁸Pb, ⁶³Cu, ⁶⁶Zn, ⁵²Cr, dan

^{60}Ni) dengan metode *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS) dan *Particle Size Analyzer* (PSA). Penelitian mencakup analisis data serta interpretasi hasil berdasarkan karakteristik biogeokimia perairan, yang kemudian dilanjutkan sesuai prosedur penelitian sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Prosedur penelitian secara umum.

3.3.1 Preparasi Sampel Sedimen

Sampel sedimen dikeringkan dalam oven pada suhu 70 °C hingga mencapai konstan, kemudian diayak menggunakan saringan berukuran 63 mikrometer untuk memperoleh fraksi halus. Fraksi halus selanjutnya ditumbuk dengan mortar dan lumpang hingga homogen, lalu digunakan dalam proses destruksi kimia guna analisis kandungan *trace elements*.

3.3.2 Analisis *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS)

Proses destruksi sampel mengikuti metode Kamzati *et al.* (2020). Sebanyak 2 gram sedimen dimasukkan ke dalam erlenmeyer, kemudian ditambahkan

10 mL campuran HNO_3 65% dan HCl 38% (3:1). Campuran tersebut dipanaskan pada suhu 70–80 °C selama 2 jam, lalu ditambahkan 6 mL H_2O_2 30% dan dipanaskan kembali pada suhu 70 °C selama 1 jam. Setelah didinginkan, larutan disaring dan filtrat ditampung dalam labu ukur 100 mL, kemudian diencerkan dengan aquades hingga mencapai volume akhir 100 mL. Larutan hasil preparasi dianalisis menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS) untuk mengukur konsentrasi *trace elements* ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni berdasarkan kurva kalibrasi larutan standar.

3.3.3 Particle Size Analysis (PSA)

Analisis ukuran butir sedimen dilakukan menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) Beckman-Coulter LS13-320 dengan modul cairan berair (*Aqueous Liquid Module/ALM*). Sampel sedimen yang telah dikeringkan pada suhu $\pm 80^\circ\text{C}$ dihancurkan perlahan hingga homogen, kemudian sebanyak 0,025 gram ditimbang dan dicampur dengan 100 mL aquades. Campuran dikocok hingga terdispersi merata sebelum dianalisis. Prinsip kerja alat *Particle Size Analyzer* (PSA) didasarkan pada difraksi cahaya laser, di mana sudut dan intensitas cahaya yang terdifraksi digunakan untuk menghitung diameter ekuivalen partikel berdasarkan teori difraksi Fraunhofer. Hasil pengukuran berupa distribusi ukuran partikel (*Particle Size Distribution/PSD*) kemudian diklasifikasikan menurut skala Wentworth dan Calde (1965) yang dikembangkan oleh Blott dan Pye, (2012) menjadi fraksi lempung (*clay*), lanau (*silt*), dan pasir (*sand*). Data *Particle Size Analyzer* (PSA) digunakan untuk menginterpretasikan karakteristik fisik sedimen laut serta hubungannya dengan kandungan *trace elements* hasil analisis *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS).

3.3.4 Analisis Indeks Pencemaran Sedimen

Hasil analisis *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (ICP-MS) dibandingkan dengan data konsentrasi *trace elements* pada sedimen dari penelitian terdahulu di wilayah regional dan global, yang digunakan untuk

mengevaluasi tingkat akumulasi *trace elements* serta memahami perbedaan karakteristik geokimia antar lokasi. Analisis lanjutan juga dilakukan untuk mengkaji hubungan antara konsentrasi *trace elements* dengan karakteristik biogeokimia sedimen, seperti kandungan bahan organik, pH, dan tekstur sedimen, guna memahami pola distribusi serta potensi dampaknya terhadap lingkungan laut (Förstner & Wittmann, 2012). Sebagai upaya untuk menilai tingkat pencemaran sedimen oleh *trace elements*, dilakukan analisis kuantitatif menggunakan tiga pendekatan indeks pencemaran, yaitu:

Contamination Factor (CF) Menggambarkan tingkat kontaminasi *trace elements* dalam sedimen dibandingkan dengan nilai latar belakang alami (Hakanson, 1980). Rumus yang digunakan:

$$CF = \frac{C_n}{B_n}$$

Keterangan:

CF = *Contamination Factor*, faktor pencemaran

C_n = konsentrasi *trace elements* dalam sedimen (mg/kg, ppm)

B_n = nilai geokimia alami/*trace elements* latar belakang (*background value*) (mg/kg, ppm)

Nilai *Contamination Factor* (CF) yang diperoleh dari hasil perhitungan kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori tingkat pencemaran untuk menilai sejauh mana *trace elements* telah terakumulasi dalam sedimen laut dalam. Klasifikasi tingkat pencemaran berdasarkan nilai CF disajikan pada Tabel 6

Tabel 6. Kategori pencemaran *Contamination Factor* (CF)

CF	Kategori
$CF < 1$	Kontaminasi rendah
$1 \leq CF < 3$	Kontaminasi sedang
$3 \leq CF < 6$	Kontaminasi cukup tinggi
$CF \geq 6$	Kontaminasi sangat tinggi

Pollution Load Index (PLI) Memberikan gambaran umum tingkat pencemaran multiparameter *trace elements* secara kumulatif (Tomlinson *et al.*, 1980).

Dihitung dengan rumus:

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$$

Keterangan:

PLI = indeks beban pencemaran total untuk semua *trace elements*

$CF_1 \dots CF_n$ = nilai CF untuk masing-masing *trace elements*

n = jumlah unsur *trace elements* yang dianalisis

Untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai tingkat pencemaran sedimen oleh berbagai unsur *trace elements*, digunakan parameter *Pollution Load Index* (PLI). Klasifikasi tingkat pencemaran berdasarkan nilai PLI disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kategori pencemaran *pollution load index* (PLI)

PLI	Kategori
PLI < 1	Tidak tercemar
PLI = 1	Menunjukkan tingkat dasar pencemaran
PLI > 1	Tercemar

Hasil perhitungan kedua indeks tersebut digunakan sebagai dasar dalam interpretasi tingkat pencemaran dan potensi risiko lingkungan dari keberadaan *trace elements* di sedimen laut dalam lokasi penelitian.

3.3.5 Analisis Statistik (*Principal Component Analysis/PCA*)

Analisis statistik multivariat dilakukan untuk mengetahui hubungan antara parameter lingkungan dan konsentrasi *trace elements* pada sedimen laut dalam. Metode yang digunakan yaitu *Principal Component Analysis* (PCA) dengan bantuan perangkat lunak XL-STAT. PCA berfungsi untuk mereduksi variabel yang saling berkorelasi menjadi beberapa komponen utama yang mampu menjelaskan sebagian besar keragaman data. Analisis PCA mencakup parameter

trace elements ^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , ^{60}Ni , serta parameter lingkungan (kedalaman, suhu, konduktivitas, oksigen terlarut, densitas, dan salinitas). Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi faktor dominan yang memengaruhi distribusi *trace elements* serta keterkaitan antar stasiun berdasarkan karakteristik fisik-kimia sedimen. Komponen dengan nilai *eigenvalue* > 1 dianggap signifikan dalam menjelaskan variabilitas data (Kaiser, 1960).

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan yaitu:

1. Sebaran horizontal konsentrasi *trace elements* (^{208}Pb , ^{63}Cu , ^{66}Zn , ^{52}Cr , dan ^{60}Ni) menunjukkan variasi spasial dengan konsentrasi tertinggi ditemukan di wilayah utara (Delta Mahakam) akibat pengaruh input daratan dan aktivitas antropogenik. Sebaliknya, konsentrasi terendah ditemukan di wilayah selatan (Selat Alas) yang dipengaruhi oleh dominasi proses alami dan arus laut terbuka.
2. Sedimen laut dalam di Selat Makassar dan Selat Lombok tergolong tidak tercemar hingga tercemar ringan, dengan nilai *Contamination Factor* (CF) 0,0005-0,0045 dan *Pollution Load Index* (PLI) 0,0026-0,0054. Akumulasi *trace elements* saat ini masih berada pada tingkat rendah dengan potensi risiko ekologis yang relatif kecil.

5.2 Saran

Pemantauan lanjutan terhadap konsentrasi *trace elements* pada sedimen laut dalam perlu dilakukan secara berkala untuk mendeteksi perubahan kadar *trace elements* seiring meningkatnya aktivitas pelayaran dan industri di sekitar Selat Makassar dan Selat Lombok. Pemantauan jangka panjang akan memberikan gambaran dinamika spasial dan temporal akumulasi *trace elements*, sekaligus menjadi dasar bagi upaya pengelolaan lingkungan laut yang berkelanjutan. Analisis tambahan terhadap karakteristik biogeokimia sedimen seperti kandungan karbon organik total (TOC), pH, dan potensial redoks (Eh) penting dilakukan untuk memperkuat interpretasi hubungan antara kondisi kimia sedimen dan distribusi *trace elements*. Parameter-parameter tersebut berperan besar dalam

menentukan mobilitas, ketersediaan hayati, serta tingkat penjerapan *trace elements* dalam matriks sedimen. Pendekatan ekotoksikologi juga disarankan untuk diterapkan, khususnya pada biota bentik seperti moluska, krustasea, dan ikan demersal, guna menilai potensi bioakumulasi *trace elements* dari sedimen ke rantai makanan laut. Kajian tersebut akan membantu mengidentifikasi risiko ekologis serta dampak potensial terhadap kesehatan manusia akibat konsumsi biota yang terpapar *trace elements* di lingkungan laut dalam

DAFTAR PUSTAKA

- Abadin, H., Fay, M., Ingerman, L., Tencza, B., Yu, D., & Wilbur, S. B. (2012). *Toxicological profile for chromium: September 2012*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry.
- Agrawal, Y. C., McCave, I. N., & Riley, J. B. (1991). Laser diffraction size analysis. In J. P. M. Syvitski (Ed.), *Principles, methods and application of particle size analysis* (pp. 119–128). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511626142.012>
- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Álvarez-Ayuso, E., & Abad-Valle, P. (2017). Trace element levels in an area impacted by old mining operations and their relationship with beehive products. *Science of the Total Environment*, 599, 671–678.
<https://www.elsevier.com/locate/scitotenv>
- American American Public Health Association. (1926). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (6th ed.). American Public Health Association.
- Anderson, R. F. (2020). GEOTRACES: Accelerating research on the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. *Annual Review of Marine Science*, 12, 49–85. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010318-095123>

- Antić-Mladenović, S., Frohne, T., Kresović, M., Stark, H.-J., Tomić, Z., Licina, V., & Rinklebe, J. (2017). Biogeochemistry of Ni and Pb in a periodically flooded arable soil: Fractionation and redox-induced (im)mobilization. *Journal of Environmental Management*, 186(2), 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.005>
- Ardila, P. A. R., Alonso, R. Á., Valsero, J. J. D., García, R. M., Cabrera, F. Á., Cosío, E. L., & Laforet, S. D. (2023). Assessment of heavy metal pollution in marine sediments from southwest of Mallorca island, Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 16852–16866. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25014-0>
- Bahmanpour, M. H. (2018). The holloway current along the shelf edge of North Western Australia (Disertasi tidak terpublikasi). University of Western Australia.
- Ballard, T., & Beare, S. (2013). Particle size analysis for sand control applications. In *Proceedings of the SPE European Formation Damage Conference & Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/165119-MS>
- Barceloux, D. G., & Barceloux, D. (1999). Nickel. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 37(2), 239–258. <https://doi.org/10.1081/CLT-100102423>
- Bardin, A. M. (2014). Novel analysis tools for ocean biogeochemical models (Disertasi tidak terpublikasi). University of California, Irvine.
- Benoit, J. M., Gilmour, C. C., & Mason, R. P. (2001). The influence of sulfide on solid phase mercury bioavailability for methylation by pure cultures of *Desulfobulbus propionicus* (1pr3). *Environmental Science & Technology*, 35(1), 127–132. <https://doi.org/10.1021/es001415n>

- Bhat, R. A., Alam, A., Jha, D. N., Kumar, V., Kumar, J., Thakur, V. R., & Das, B. K. (2024). Fate and effects of heavy metals in fishes: Antioxidant defense system, miRNA/gene expression response, and histopathological reproductive manifestations. *Biological Trace Element Research*, 203(8), 4326–4346. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04478-w>
- Birch, G. F., & Olmos, M. A. (2008). Sediment-bound heavy metals as indicators of human influence and biological risk in coastal water bodies. *ICES Journal of Marine Science*, 65(8), 1407–1413. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn139>
- Bjørklund, G., Dadar, M., Mutter, J., & Aaseth, J. (2017). The toxicology of mercury: Current research and emerging trends. *Environmental Research*, 159, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.051>
- Blott, S. J., & Pye, K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59(7), 2071–2096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x>
- Blott, S. J., Croft, D. J., Pye, K., Saye, S. E., & Wilson, H. E. (2004). Particle size analysis by laser diffraction. *Geological Society, London, Special Publications*, 232, 63–73. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.232.01.08>
- Bonanno, G., & Pavone, P. (2015). Leaves of *Phragmites australis* as potential atmospheric biomonitors of platinum group elements. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 114, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.01.005>
- Borch, T., Kretzschmar, R., Kappler, A., Van Cappellen, P., Ginder-Vogel, M., Voegelin, A., & Campbell, K. (2010). Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 15–23. <https://doi.org/10.1021/es9026248>

- Bradl, H. B. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soil constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.005>
- Bruland, K. W., Donat, J. R., & Hutchins, D. A. (1991). Interactive influences of bioactive trace metals on biological production in oceanic waters. *Limnology and Oceanography*, 36(8), 1555–1577.
<https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.8.1555>
- Buccolieri, A., Buccolieri, G., Cardellicchio, N., Dell’Atti, A., Di Leo, A., & Maci, A. (2006). Heavy metals in marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy). *Marine Chemistry*, 99(1–4), 227–235.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2005.09.009>
- Bulska, E., & Wagner, B. (2016). Quantitative aspects of inductively coupled plasma mass spectrometry. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2079), 20150369. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0369>
- Burger, J., & Gochfeld, M. (2005). Heavy metals in commercial fish in New Jersey. *Environmental Research*, 99(3), 403–412.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.02.001>
- Buxton, S., Garman, E., Heim, K. E., Lyons-Darden, T., Schlekot, C. E., Taylor, M. D., & Oller, A. R. (2019). Concise review of nickel human health toxicology and ecotoxicology. *Inorganics*, 7(7), 89–105.
<https://doi.org/10.3390/inorganics7070089>
- Calmano, W., Hong, J., & Förstner, U. (1993). Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water Science and Technology*, 28(8–9), 223–235.
<https://doi.org/10.2166/wst.1993.0586>

- Calvert, S. E., & Pedersen, T. F. (2007). Elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: Interpretation and application. *Earth-Science Reviews*, 85(1), 1–26.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.06.002>
- Chang, Y.-C. (2012). Reply to Comment on Chang and Zhao (2012) "The Fukushima Nuclear Power Station incident and marine pollution". *Marine Pollution Bulletin*, 64, 1982.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.008>
- Clarkson, T. W., Magos, L., & Myers, G. J. (2003). The toxicology of mercury current exposures and clinical manifestations. *New England Journal of Medicine*, 349(18), 1731–1737. <https://doi.org/10.1056/NEJMra022471>
- Costa, M., & Klein, C. B. (2006). Toxicity and carcinogenicity of chromium compounds in humans. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(2), 155–163.
<https://doi.org/10.1080/10408440500534032>
- Cotton, F. A., & Wilkinson, G. (1989). *Kimia anorganik dasar* (S. Suharto, Penerjemah). Universitas Indonesia-Press.
- da Silva, I. J. S., Lavorante, A. F., Paim, A. P. S., & da Silva, M. J. (2020). Microwave-assisted digestion employing diluted nitric acid for mineral determination in rice by ICP OES. *Food Chemistry*, 319, 126435.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126435>
- Darmono. (1995). *Logam dalam sistem biologi makhluk hidup*. Universitas Indonesia.
- Das, K. K., Das, S. N., & Dhundasi, S. A. (2008). Nickel, its adverse health effects & oxidative stress. *Indian Journal of Medical Research*, 128(4), 412–425. <https://ijmr.org.in/article.asp?issn=09715916>

- Boer, de, G. B. J., Weerd, de, C., Thoenes, D., & Goossens, H. W. J. (1987). Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer diffraction versus Mie scattering. *Particle Characterization*, 4(1–4), 14–19.
<https://doi.org/10.1002/ppsc.19870040104>
- Deverel, S. J., Goldberg, S., & Fujii, R. (1990). Chemistry of trace elements in soils and groundwater. In K. K. Tanji (Ed.), *Agricultural salinity assessment and management* (pp. 64–90). ASCE.
- Di Stefano, C., Ferro, V., & Mirabile, S. (2010). Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering*, 106(2), 205–215.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.03.013>
- Di Toro, D. M., Allen, H. E., Bergman, H. L., Meyer, J. S., Paquin, P. R., & Santore, R. C. (2001). Biotic ligand model of the acute toxicity of metals. 1. Technical basis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(10), 2383–2396. <https://doi.org/10.1002/etc.5620201034>
- Dick, D. M. (2016). Spatio-temporal analysis and modeling in the marine environment: Humpback whale genetic variability and seabird distributions in the northeastern Pacific Ocean (Disertasi tidak terpublikasi). Oregon State University.
- Dzombak, D. A., & Morel, F. M. (1991). *Surface complexation modeling: Hydrous ferric oxide*. John Wiley & Sons.
- Effendi, H. (2003). *Telaah kualitas air bagi pengelolaan sumber daya dan lingkungan perairan*. Kanisius.
- Eggleton, J., & Thomas, K. V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*, 30(7), 973–980.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001>

- Elobaid, E. A., Yigiterhan, O., Al-Ansari, E. M. A. S., Chen, Z., Mohieldeen, Y. E., & Abdalla, R. (2025). Ecological risk assessment of heavy metals in the marine sediments associated with the petroleum hydrocarbon industry in the central Arabian Gulf. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 19, 100749. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100749>
- Estournel, C., Bosc, E., Bocquet, M., Ulses, C., Marsaleix, P., Winiarek, V., Osvath, I., Nguyen, C., Duhaut, T., Lyard, F., Michaud, H., & Auclair, F. (2012). Assessment of the amount of cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117. <https://doi.org/10.1029/2012JC007933>
- Fan, H., Chen, S., Li, Z., Liu, P., Xu, C., & Yang, X. (2020). Assessment of heavy metals in water, sediment and shellfish organisms in typical areas of the Yangtze River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110864. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110864>
- Fardiaz, S. (1992). *Polusi Air dan Udara*. Kanisius.
- Ffield, A., & Gordon, A. L. (1996). Tidal mixing signatures in the Indonesian Seas. *Journal of Physical Oceanography*, 26(9), 1924–1937. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026)
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. (2012). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69385-4>
- Frank, D. S., Mora, M. A., Sericano, J. L., Blankenship, A. L., Kannan, K., & Giesy, J. P. (2001). Persistent organochlorine pollutants in eggs of colonial waterbirds from Galveston Bay and East Texas, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 20(3), 608–617. <https://doi.org/10.1002/etc.5620200321>

- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Gargouri, D., Azri, C., Serbaji, M. M., Jedoui, Y., & Montacer, M. (2011). Heavy metal concentrations in the surface marine sediments of Sfax Coast, Tunisia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 175, 519–530. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1548-7>
- Gledhill, M., & Buck, K. N. (2012). The organic complexation of iron in the marine environment: A review. *Frontiers in Microbiology*, 3, 69.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00069>
- Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian seas and their throughflow. *Oceanography*, 18(4), 14–27.
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.01>
- Gordon, A. L., Susanto, R. D., & Vranes, K. (2003). Cool Indonesian Throughflow as a consequence of restricted surface layer flow. *Nature*, 425(6959), 824–828. <https://doi.org/10.1038/nature02038>
- Groom, S., Sathyendranath, S., Ban, Y., Bernard, S., Brewin, R., Brotas, V., ... & Wang, M. (2019). Satellite ocean colour: current status and future perspective. *Frontiers in Marine Science*, 6, 485.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00485>
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hansen, J. A., Welsh, P. G., Lipton, J., Cacela, D., & Dailey, A. D. (2002). Relative sensitivity of bull trout (*Salvelinus confluentus*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to acute exposures of cadmium and zinc. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(1), 67–75.
<https://doi.org/10.1002/etc.5620210110>

- Harlyan, L. I., Hikmah, S., & Sari, J. (2015). Konsentrasi logam berat Pb, Cu dan Zn pada air dan sedimen permukaan ekosistem mangrove di Muara Sungai Porong, Sidoarjo, Jawa Timur. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 20(1), 52–60.
- Harmesa, H., Lestari, L., & Budiyo, F. (2020). Distribusi logam berat dalam air laut dan sedimen di perairan Cimanuk, Jawa Barat, Indonesia. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 5(1), 19–32.
<https://doi.org/10.14203/oldi.2020.v5i1.310>
- Hirmawan, A., Azies, I. A., & Pranowo, W. S. (2023). Karakteristik arus laut berdasarkan data model global di perairan Benoa, Bali: Characteristics of ocean currents based on global model data in Benoa waters, Bali. *Jurnal Hidropilar*, 9(2), 91–102. <https://doi.org/10.37875/hidropilar.v9i2.290>
- Hogstrand, C., Verbost, P. M., Bonga, S. E. W., & Wood, C. M. (1996). Mechanisms of zinc uptake in gills of freshwater rainbow trout: interplay with calcium transport. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 270(5), R1141–R1147.
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.1996.270.5.R1141>
- Hornberger, M. I., Luoma, S. N., Van Geen, A., Fuller, C., & Anima, R. (1999). Historical trends of metals in the sediments of San Francisco Bay, California. *Marine Chemistry*, 64(1–2), 39–55.
[https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(98\)80083-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(98)80083-2)
- Hutabarat, M. F., Purba, N. P., Astuty, S., Syamsuddin, M. L., & Kuswardani, A. R. T. D. (2018). Variabilitas lapisan termoklin terhadap kenaikan mixed layer depth (MLD) di Selat Makassar. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 9(1), 9–21.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (1990). Nickel and nickel compounds. *Chromium, Nickel and Welding*. International Agency for Research on Cancer.

- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Jezerska, B., & Witeska, M. (2006). The metal uptake and accumulation in fish living in polluted waters. In: Twardowska, I., Allen, H.E., Häggblom, M.M., Stefaniak, S. (eds) *Soil and water pollution monitoring, protection and remediation*. NATO Science Series, 69: 107–114. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4728-2_6
- Jezierska, B., & Witeska, M. (2006). The metal uptake and accumulation in fish living in polluted waters. In I. Twardowska, H. E. Allen, M. M. Häggblom, & S. Stefaniak (Eds.), *Soil and water pollution monitoring, protection and remediation* (pp. 107–114). Springer Netherlands.
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Kamzati, L. L. J., Kaonga, C. C., Mapoma, H. W. T., Thulu, F. G., Abdel-dayem, S. M., Anifowose, A. J., Chidya, R. C. G., Chitete-Mawenda, U., & Sakugawa, H. (2020). Heavy metals in water, sediment, fish and associated risks from an endorheic lake located in Southern Africa. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(1), 253–266. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02464-7>
- Khurshid, A., Inayat, R., Tamkeen, A., Ul Haq, I., Li, C., Boamah, S., Zhou, J.-J., Liu, C., & Liu, C. (2021). Antioxidant enzymes and heat-shock protein genes of green peach aphid (*Myzus persicae*) under short-time heat stress. *Frontiers in Physiology*, 12, 805509. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.805509>

- Kimbrough, D. E., Cohen, Y., Winer, A. M., Creelman, L., & Mabuni, C. (1999). A critical assessment of chromium in the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1), 1–46. <https://doi.org/10.1080/10643389991259164>
- Kusuma, A. H. (2019). Sebaran kualitas air pantai utara Jakarta pasca reklamasi di perairan Teluk Jakarta. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 10, 1–23.
- Kusuma, A. H., Prartono, T., Atmadipoera, A. S., & Arifin, T. (2015). Sebaran logam berat terlarut dan terendapkan di perairan Teluk Jakarta pada bulan September 2014. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 6(1), 41–49. <https://doi.org/10.24319/jtpk.6.41-49>
- Lestari, & Budiyanto, F. (2013). Konsentrasi Hg, Cd, Cu, Pb, dan Zn dalam sedimen di perairan Gresik. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 5(1), 182–191. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v5i1.7764>
- Liu, S., Shi, X., Liu, Y., Zhu, Z., Yang, G., Zhu, A., & Gao, J. (2011). Concentration distribution and assessment of heavy metals in sediments of mud area from inner continental shelf of the East China Sea. *Environmental Earth Sciences*, 64(2), 567–579. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0941-z>
- Long, E. R., MacDonald, D. D., Smith, S. L., & Calder, F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19(1), 81–97. <https://doi.org/10.1007/BF02472006>
- Luoma, S. N. (2018). Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments. In: *Heavy Metals in the Marine Environment* (pp. 51–66). CRC Press.

- Maret, W., & Sandstead, H. H. (2006). Zinc requirements and the risks and benefits of zinc supplementation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 20(1), 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2006.01.006>
- Martins, C., Jesus, F. T., & Nogueira, A. J. A. (2017). The effects of copper and zinc on survival, growth and reproduction of the cladoceran *Daphnia longispina*: Introducing new data in an “old” issue. *Ecotoxicology*, 26, 1157–1169. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1841-0>
- Masiol, M., Facca, C., Visin, F., Sfriso, A., & Pavoni, B. (2014). Interannual heavy element and nutrient concentration trends in the top sediments of Venice Lagoon (Italy). *Marine Pollution Bulletin*, 89(1), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.036>
- Mazarakioti, E. C., Zotos, A., Thomatou, A. A., Kontogeorgos, A., Patakas, A., & Ladavos, A. (2022). Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), a useful tool in authenticity of agricultural products’ and foods’ origin. *Foods*, 11(22). <https://doi.org/10.3390/foods11223705>
- Middelburg, J. J., & Levin, L. A. (2009). Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. *Biogeosciences*, 6(7), 1273–1293. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1273-2009>
- Miller, P. E., & Denton, M. B. (1986). The quadrupole mass filter: Basic operating concepts. *Journal of Chemical Education*, 63(7), 617–622. <https://doi.org/10.1021/ed063p617>
- Moore, J. W., & Ramamoorthy, S. (2012). *Heavy metals in natural waters: Applied monitoring and impact assessment*. Springer Science & Business Media.
- Morse, J. W., & Luther, G. W. (1999). Chemical influences on trace metal–sulfide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19–20), 3373–3378. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00258-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00258-6)

- Nieboer, E., & Nriagu, J. O. (1992). *Nickel and human health: Current perspectives*. Wiley.
- Nugraha, H. D., Jackson, C. A. L., Johnson, H. D., & Hodgson, D. M. (2020). Lateral variability in strain along the toewall of a mass transport deposit: A case study from the Makassar Strait, offshore Indonesia. *Journal of the Geological Society*, 177(6), 1261–1279. <https://doi.org/10.1144/jgs2020-048>
- Nugraha, M. A., Hudatwi, M., & Sari, F. I. P. (2019). Source identification, bioavailability, and risk assessment of heavy metals Pb, Cu, and Zn in surface sediments of Kelabat Bay, Bangka Island. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 24(3), 139–145. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.24.3.139-145>
- Nuzula, F. Y., L. P. S., Laksmini, M., Martono, & Purba, N. P. (2016). Variabilitas temporal eddy di perairan Makassar – Laut Flores. *Jurnal Perikanan Kelautan*, 7(1), 130–138. <https://jurnal.unpad.ac.id/jpk/article/view/13950>
- Özden, S., & Aközcan, S. (2024). Seasonal variations of radioactivity concentrations in soil and sediment of Meriç River, Turkey. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 92–100. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1348746>
- Paetzel, M., & Schrader, H. (1991). Heavy metal (Zn, Cu, Pb) accumulation in the Barsnesfjord: Western Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 71(2), 65–73.
- Paul, S. A., Schmidt, K., Achterberg, E. P., & Koschinsky, A. (2024). The importance of the soluble and colloidal pools for trace metal cycling in deep-sea pore waters. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1339772. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1339772>

- Peng, W., Li, X., Xiao, S., & Fan, W. (2018). Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 1701–1719. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1916-9>
- Plum, L. M., Rink, L., & Haase, H. (2010). The essential toxin: impact of zinc on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(4), 1342–1365. <https://doi.org/10.3390/ijerph7041342>
- Polapa, F. S., Annisa, R. N., Yanuarita, D., & Ali, S. M. (2022). Quality indeks dan konsentrasi logam berat dalam perairan dan sedimen di perairan Kota Makassar. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 271–278. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.271-278>
- Pupyshev, A. A., & Semenova, E. V. (2001). Formation of doubly charged atomic ions in the inductively coupled plasma. *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, 56(12), 2397–2418. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00301-9](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00301-9)
- Putri, W. A. E., Meiyerani, J., Ulqodry, T. Z., Aryawati, R., Purwiyanto, A., Rozirwan, R., & Suteja, Y. (2025). Ecological risk assessment through heavy metal concentrations of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel in marine sediments of Maspari Island, South Sumatra Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 26(2), 297–310. <https://doi.org/10.12911/22998993/197413>
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., Díaz, R. J., & Justić, D. (2009). Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7), 1528–1537. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047>
- Rand, G. M., & Petrocelli, S. R. (1984). *Fundamentals of aquatic toxicology: methods and applications*. FMC Corp., Princeton, NJ.

- Reopanichkul, P., Schlacher, T. A., Carter, R. W., & Worachananant, S. (2009). Sewage impacts coral reefs at multiple levels of ecological organization. *Marine Pollution Bulletin*, 58(9), 1356–1362.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.024>
- Richard, F. C., & Bourg, A. C. M. (1991). Aqueous geochemistry of chromium: A review. *Water Research*, 25(7), 807–816.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90160-R](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90160-R)
- Rodushkin, I., Ruth, T., & Huhtasaari, Å. (1999). Comparison of two digestion methods for elemental determinations in plant material by ICP techniques. *Analytica Chimica Acta*, 378(1), 191–200.
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00635-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00635-7)
- Rubin, D. M., & Hesp, P. A. (2009). Multiple origins of linear dunes on Earth and Titan. *Nature Geoscience*, 2, 653–658.
<https://doi.org/10.1038/NGEO610>
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2014). Composition of the continental crust. *The Crust, Treatise on Geochemistry*, 3, 17-18.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Santana-Casiano, J. M., & González-Dávila, M. (1992). Characterization of the sorption and desorption of lindane to chitin in seawater using reversible and resistant components. *Environmental Science & Technology*, 26(1), 90–95. <https://doi.org/10.1021/es00025a008>
- Sarkar, B., Chatterjee, A., Adhikari, S., & Ayyappan, S. (2005). Carbofuran- and cypermethrin-induced histopathological alterations in the liver of *Labeo rohita* (Hamilton) and its recovery. *Journal of Applied Ichthyology*, 21(2), 131–135. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2004.00590.x>

- Schlitzer, R. (2015). Data analysis and visualization with Ocean Data View. *CMOS Bulletin SCMO*, 43(1), 9–13.
- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment International*, 31(5), 739–753. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.003>
- Simon, M. G. (2014). Microfluidic tools for stem cell biology (Disertasi tidak terpublikasi). University of California, Irvine.
- Singh, V., Singh, N., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A. K., Singh, M. P., ... & Mishra, V. (2023). Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Toxics*, 11(2), 147. <https://doi.org/10.3390/toxics11020147>
- Smrzka, D., Feng, D., Himmler, T., Zwicker, J., Hu, Y., Monien, P., ... & Peckmann, J. (2020). Trace elements in methane-seep carbonates: Potentials, limitations, and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 208, 103263. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103263>
- Søfteland, L., Holen, E., & Olsvik, P. A. (2010). Toxicological application of primary hepatocyte cell cultures of Atlantic cod (*Gadus morhua*)—effects of BNF, PCDD and Cd. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 151(4), 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2010.01.003>
- Sprintall, J., Wijffels, S., Molcard, R., & Jaya, I. (2010). Direct evidence of the south Java current system in Ombai Strait. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50(2), 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2010.02.006>
- Stauber, J. L., & Florence, T. M. (1987). Mechanism of toxicity of ionic copper and copper complexes to algae. *Marine Biology*, 94, 511–519. <https://doi.org/10.1007/BF00431397>

- Stumm, W., & Morgan, J. J. (2013). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley & Sons.
- Sulistiawati, R. (2019). Konsentrasi logam berat pada sedimen di perairan Selat Makassar bagian selatan (Skripsi tidak terpublikasi). Repository IPB University. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/96164>
- Sundaray, S. K., Nayak, B. B., & Bhatta, D. (2009). Environmental studies on river water quality with reference to suitability for agricultural purposes: Mahanadi river estuarine system, India—a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 155(1), 227–243.
- Susanto, R. D., & Gordon, A. L. (2005). Velocity and transport of the Makassar Strait throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C1), C01005. <https://doi.org/10.1029/2004JC002425>
- Susanto, R. D., Gordon, A. L., & Sprintall, J. (2007). Observations and proxies of the surface layer throughflow in Lombok Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C3), C03031. <https://doi.org/10.1029/2006JC003790>
- Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6), 611–627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- Szefer, P., Szefer, K., Glasby, G. P., Pempkowiak, J., & Kaliszan, R. (1996). Heavy-metal pollution in surficial sediments from the Southern Baltic Sea off Poland. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 31(10), 2723–2754. <https://doi.org/10.1080/10934529609376520>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(1), 566–575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Troupin, C., Barth, A., Sirjacobs, D., Ouberdous, M., Brankart, J. M., Brasseur, P., ... & Beckers, J. M. (2012). Generation of analysis and consistent error fields using the Data Interpolating Variational Analysis (DIVA). *Ocean Modelling*, 52, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.05.002>
- Tuahatu, J. W., Tubalawony, S., & Kalay, D. E. (2022). Konsentrasi logam berat Pb dan Cd dalam sedimen pada ekosistem mangrove di Teluk Ambon. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(3), 379–394. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i3.37461>
- Turekian, K. K., & Imbrie, J. (1966). The distribution of trace elements in deep-sea sediments of the Atlantic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 1(4), 161–168. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(66\)90063-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(66)90063-X)
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175–192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2)
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Bulletin of the Geological Society of America*, 72(2), 175–192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2)
- Ulfah, E. S., Rahardja, B. S., & Pursetyo, K. T. (2019). Studi kandungan logam berat kadmium (Cd) pada berbagai ukuran kerang darah (*Anadara granosa*) di Perairan Pantai Bancaran, Kabupaten Bangkalan, Madura. *Journal of Marine and Coastal Science*, 8(3), 107–108. <https://e-journal.unair.ac.id/JMCS>

- Valdez Salas, B., Schorr Wiener, M., Zlatev Koytchev, R., López Badilla, G., Ramos Irigoyen, R., Carrillo Beltrán, M., ... & Bastidas Rull, J. M. (2013). Copper corrosion by atmospheric pollutants in the electronics industry. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 846405. <https://doi.org/10.1155/2013/846405>
- Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1-2), 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2003.07.011>
- Wang, W., Bai, J., Zhang, G., Jia, J., Wang, X., Liu, X., & Cui, B. (2019). Occurrence, sources and ecotoxicological risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediment cores from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Delta, China. *Chemosphere*, 218, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.046>
- Wang, X., Wang, J., Mao, S. H., Zhou, Z., Liu, Q., He, Q., & Zhuang, G. C. (2024). Speciation and distribution of arsenic in cold seep sediments of the South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 202, 116258. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.116258>
- WHO. (1972). Quarantinable diseases: number of reported cases and registered deaths in 1971 and in 1972. *World Health Statistics Quarterly*, 25(10), 732–741. <https://iris.who.int/handle/10665/75343>
- Wilschefske, S. C., & Baxter, M. R. (2019). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *Clinical Biochemist Reviews*, 40(3), 115–133. <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024>
- Wu, J., Zheng, X., Chen, J., Yang, G., Zheng, J., & Aono, T. (2022). Distributions and impacts of plutonium in the environment originating from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: an overview of a decade of studies. *Journal of Environmental Radioactivity*, 248, 106884. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106884>

- Wu, X., Cobbina, S. J., Mao, G., Xu, H., Zhang, Z., & Yang, L. (2016). A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(9), 8244–8259. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6333-x>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011(1), 402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Xu, G., Liu, J., Pei, S., Gao, M., Hu, G., & Kong, X. (2015). Sediment properties and trace metal pollution assessment in surface sediments of the Laizhou Bay, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 11634–11647. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4384-y>
- Xu, Q., Wu, B., & Chai, X. (2022). In situ remediation technology for heavy metal contaminated sediment: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16767. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416767>
- Yang, J., Li, X., Xiong, Z., Wang, M., & Liu, Q. (2020). Environmental pollution effect analysis of lead compounds in China based on life cycle. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2184. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072184>
- Zhang, H., Tang, D., He, J., Yang, X., Feng, Z., Fu, Y., ... & Ma, S. (2024). Assessment of heavy metal contamination in the surface sediments, seawater and organisms of the Pearl River Estuary, South China Sea. *Science of the Total Environment*, 950, 175266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175266>
- Zhang, Y. (2022). Understanding the dynamics of the Indonesian Throughflow and its global significance, both today and in the Late Quaternary (Doctoral dissertation, University of Sheffield).