

**SEBARAN HORIZONTAL *TRACE ELEMENTS* (^{75}As DAN ^{111}Cd) PADA
SEDIMEN LAUT DALAM: STUDI KASUS DI SELAT MAKASSAR DAN
LAUT BALI**

SKRIPSI

Oleh

**ANNISA NURJANAH
2214221024**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**SEBARAN HORIZONTAL *TRACE ELEMENTS* (^{75}As DAN ^{111}Cd) PADA
SEDIMEN LAUT DALAM: STUDI KASUS DI SELAT MAKASSAR DAN
LAUT BALI**

Oleh

ANNISA NURJANAH

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* (^{75}As DAN ^{111}Cd) PADA SEDIMEN LAUT DALAM: STUDI KASUS DI SELAT MAKASSAR DAN LAUT BALI

Oleh

ANNISA NURJANAH

Sedimen laut dalam berperan sebagai arsip geokimia yang merekam proses lingkungan dan potensi akumulasi *trace elements* akibat interaksi faktor alami maupun aktivitas antropogenik. Selat Makassar hingga Laut Bali merupakan kawasan oseanografi strategis karena dilalui Arus Lintas Indonesia (Arlindo) serta dipengaruhi masukan material daratan, aktivitas pelayaran, dan dinamika laut dalam, namun kajian mengenai distribusi *trace elements* pada sedimen laut dalam tropis Indonesia masih terbatas. Penelitian bertujuan untuk menganalisis konsentrasi *trace elements* ^{75}As dan ^{111}Cd pada sedimen laut dalam serta mengevaluasi tingkat kontaminasi dan indikasi sumber alaminya maupun antropogeniknya. Sampel sedimen diperoleh dari lima stasiun pengamatan dalam ekspedisi GEOMARIN III menggunakan kapal riset Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia. Preparasi sampel dilakukan melalui proses destruksi basah, dan analisis kandungan unsur dilakukan menggunakan *Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry* (ICP-MS) berdasarkan EPA Method 6020A. Karakteristik fisik sedimen dianalisis menggunakan *Dynamic Light Scattering* (DLS), sementara tingkat kontaminasi dievaluasi melalui *Contamination Factor* (CF) dan *Pollution Load Index* (PLI) dan *Enrichment Factor* (EF), serta didukung analisis statistik. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi ^{75}As berkisar 0,08–0,53 mg/kg dan ^{111}Cd 0,001–0,012 mg/kg, yang tergolong rendah dan berada di bawah nilai rata-rata global. Nilai CF dan PLI pada seluruh stasiun < 1 dan masuk kategori tidak tercemar hingga tercemar rendah. Nilai EF mengindikasikan dominasi sumber alami dengan pengayaan antropogenik ringan hingga sedang, terutama di wilayah Delta Mahakam dan sekitar Pulau Kangean. Secara keseluruhan, sedimen laut dalam di wilayah penelitian berada pada kondisi geokimia relatif stabil dengan pengaruh antropogenik yang terbatas.

Kata Kunci: Arus Lintas Indonesia (Arlindo), Sedimen Laut Dalam, *Trace Element*

ABSTRAK

HORIZONTAL DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS (^{75}As AND ^{111}Cd) IN DEEP SEA SEDIMENTS: A CASE STUDY IN THE MAKASSAR STRAIT AND THE BALI SEA

By

ANNISA NURJANAH

Deep-sea sediments serve as geochemical recording environmental dynamics and trace element accumulation driven by natural and anthropogenic processes. The Makassar Strait to the Bali Sea is an oceanographically strategic region influenced by the Indonesian Throughflow (Arlindo), terrestrial inputs, shipping activities, and deep-sea dynamics, yet studies on trace element distribution in Indonesian tropical deep-sea sediments remain limited. This study was investigated the concentrations of ^{75}As and ^{111}Cd in deep-sea sediments and evaluate the level of contamination and indications of natural and anthropogenic sources. Sediment samples were collected from five observation stations during the GEOMARIN III Expedition using a research vessel from the Geological Agency, Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia. Sample preparation was carried out through wet destruction, while element concentration analysis was performed using Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS) based on EPA Method 6020A. The physical characteristics of the sediments were analyzed using Dynamic Light Scattering (DLS). The level of contamination was evaluated through the Contamination Factor (CF), Pollution Load Index (PLI), and Enrichment Factor (EF), supported by statistical analysis. Results show that ^{75}As ranged from 0.08 to 0.53 mg/kg and ^{111}Cd from 0.001 to 0.012 mg/kg, which is low and below the global average. The CF and PLI values at all stations were < 1, indicating unpolluted to low-polluted categories. The EF values indicated the dominance of natural sources with light to moderate anthropogenic enrichment, especially in the Mahakam Delta and around Kangean Island. Overall, deep-sea sediments in the study area were exhibits relatively stable geochemical condition with limited anthropogenic influence.

Keywords: Deep Sea Sediments, Indonesian Throughflow (ITF), Trace Elements

Judul skripsi

: **SEBARAN HORIZONTAL *TRACE ELEMENTS***
(⁷⁵As DAN ¹¹¹Cd) PADA SEDIMEN LAUT
DALAM STUDI KASUS DI SELAT
MAKASSAR DAN LAUT BALI

Nama Mahasiswa

: **Annisa Nurjanah**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2214221024**

Program Studi

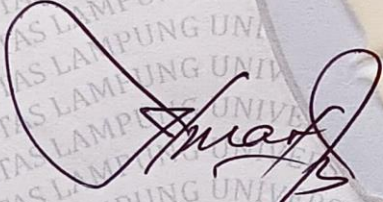
: **Ilmu Kelautan**

Fakultas

: **Pertanian**

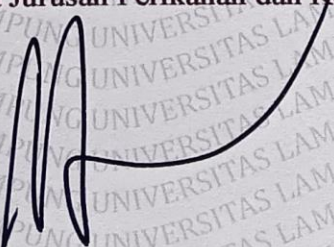
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


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

 **TT ELEKTRONIK**
Yogi Priasetyono, S.Si., M.Si.
NIP. 199208142018011001

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan

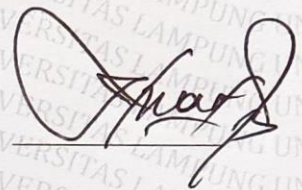

Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198309232006042001

MENGESAHKAN

1. Tim penguji

Ketua

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

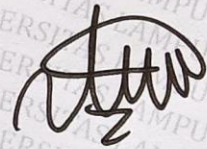


Sekretaris

: Yogi Priasetyono, S.Si., M.Si

 TT ELEKTRONIK

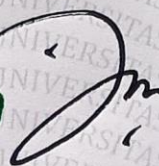
Penguji Bukan Pembimbing : Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si



2. Dekan Fakultas Petanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P
No. 196411 18198902 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 13 Januari 2026



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

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah skripsi yang berjudul "**Sebaran Horizontal *Trace Elements* (As dan Cd) Pada Sedimen Laut Dalam: Studi Kasus Di Selat Makassar dan Laut Bali**" tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh pihak lain untuk mendapatkan karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebut dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata dalam naskah skripsi ini ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur fabrikasi, falsifikasi, plagiat dan konflik kepentingan saya bersedia skripsi ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (S1) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Bandar Lampung, Februari 2026

Yang membuat pernyataan



Annisa Nurjanah

NPM. 2214221024

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bumi Dipasena Makmur, Kecamatan Rawajitu Timur, Kabupaten Tulang Bawang, Provinsi Lampung, pada tanggal 23 Juni 2004 sebagai anak dari pasangan suami istri Bapak Suyatno dan Ibu Parsiyah. Penulis menempuh pendidikan formal dari TK Dharma Wanita Dipasena Makmur, Lampung pada tahun 2008 – 2010, lalu melanjutkan pendidikan dasar di SD N 1 BD Makmur pada tahun 2010 – 2016, dilanjutkan ke pendidikan menengah pertama di SMPN 2 Rawajitu Timur pada tahun 2016 – 2019, dan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Pringsewu pada tahun 2019 – 2022.

Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi pada Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada tahun 2022. Selama menempuh pendidikan tinggi, penulis pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Avertebrata Laut dan Mikrobiologi Laut pada tahun 2024. Selain itu, penulis juga melaksanakan magang di (BBPBL) Balai Besar Perikanan Budidaya Laut Lampung selama 20 hari pada tahun 2024. Penulis pernah bergabung dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (HIMAPIK) sebagai anggota pada tahun 2024. Penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Wirausaha Merdeka “PROTEKSI Unila 2024”, yaitu program technopreneurship mahasiswa Universitas Lampung yang bertujuan untuk menginkubasi bisnis sekaligus mengembangkan jiwa kewirausahaan mahasiswa melalui kompetisi dan pameran, selama enam bulan. Serta mengikuti Program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Magang Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) pada tahun 2025 selama enam bulan.

Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Fajar Mataram, Kecamatan Seputih Mataram, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung pada ta-

hun 2025. Selain itu, penulis juga melaksanakan Praktik Umum (PU) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir pada tahun 2025. Selanjutnya, penulis melanjutkan kegiatan Tugas Akhir (TA) di PRTKMMN-BRIN yang dilaksanakan pada bulan Agustus – Desember 2025. Melalui kegiatan tersebut, penulis dapat menyelesaikan skripsinya di bawah bimbingan dosen pembimbing, dengan judul penelitian “Sebaran Horizontal *Trace Elements* (^{75}As Dan ^{111}Cd) Pada Sedimen Laut Dalam: Studi Kasus Di Selat Makassar Dan Laut Bali.”

Bismillahirrahmanirrahim

Untuk kedua orang tuaku tersayang

Bapak Suyatno dan Ibu Parsiyah

Yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, dan doa yang selalu dilangitkan serta kasih sayang tiada terhingga. Terima kasih atas semua perjuangan dan pengorbanan untukku.

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan ke hadirat Tuhan yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi dengan judul “*Sebaran Horizontal Trace Elements (^{75}As dan ^{111}Cd) Pada Sedimen Laut Dalam: Studi Kasus Di Selat Makassar Dan Laut Bali*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana perikanan di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan FP 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. Yogi Priasetyono, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Pembantu/Sekretaris;
5. Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si. selaku Penguji Utama;
6. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suyatno dan Ibu Parsiyah, yang senantiasa mendoakan, memberikan dukungan, serta menaruh kepercayaan penuh kepada penulis untuk terus melangkah dan berkembang. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada kedua kakak penulis, yang meskipun terlihat sederhana dalam mengekspresikan perhatian, selalu memberikan kasih sayang dan dukungan dengan cara masing-masing.
7. Kepada teman-teman yang selalu hadir, memberikan dukungan, serta senantiasa mendorong penulis untuk melakukan hal-hal positif selama proses penyusunan skripsi.
8. Terakhir untuk diri sendiri Annisa Nurjanah terimakasih tetap kuat sampai sekarang.

Bandar Lampung, 18 Februari 2026

Annisa Nurjanah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	4
1.3 Manfaat Penelitian	4
1.4 Kerangka Pikir	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Karakteristik Lingkungan Studi	7
2.2 Biogeokimia <i>Trace Elements</i>	9
2.2.1 Arsen (As)	10
2.2.2 Kadmium (Cd)	12
2.4 Resiko <i>Trace Elements</i> di Lingkungan Laut	13
2.5 ICP-MS	15
III. METODE PENELITIAN	18
3.1 Waktu dan Tempat	18
3.1.1 Waktu Penelitian	18
3.1.2 Tempat Penelitian	18
3.2 Bahan dan Alat	19
3.2.1 Bahan	20
3.2.2 Alat	20
3.3 Prosedur Penelitian	21
3.3.1 Pengambilan Sampel	21
3.3.2 Preparasi Sampel	22
3.3.3 Destruksi	22
3.4 Analisis Sampel	23
3.5 Analisis Karakteristik Sedimen	23
3.5.1 <i>Particulate Size Analyser</i>	23
3.5.2 <i>Contamination Factor (CF)</i>	26
3.5.3 <i>Pollution Load Index (PLI)</i>	26
3.5.4 <i>Geoaccumulation Index (Igeo)</i>	26
3.5.5 <i>Enrichment Factor (EF)</i>	27

3.6 Analisis Statistik	27
3.7 Analisis Data.....	27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Konsentrasi <i>Trace Elements</i> (^{75}As dan ^{111}Cd)	29
4.1.1 Sebaran Horizontal <i>Trace Elements</i>	29
4.1.2 Penilaian Kontaminasi Sedimen	35
4.1.3 Pengaruh Pergerakan Massa Air di Lokasi Penelitian	39
4.2 Distribusi Ukuran Fraksi Sedimen	40
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1 Simpulan.....	45
5.2 Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir.....	6
2. Karakteristik fisik dan kimia unsur arsenik (As)	11
3. Karakteristik fisik dan kimia unsur kadmium (Cd).....	12
4. Skema penampang ICP-MS	16
5. Peta lokasi pengambilan sampel	19
6. Skema penampang <i>dynamic light scattering</i>	24
7. Variasi konsentrasi <i>trace element</i> (^{75}As) pada masing-masing lokasi	30
8. Variasi konsentrasi <i>trace element</i> (^{111}Cd) pada masing-masing lokasi	32
9. Intensitas fraksi sedimen (%) di lokasi penelitian.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi CF dan PLI.....	15
2. Klasifikasi Igeo dan EF	15
3. Alat yang digunakan pada penelitian	20
4. Titik koordinat dan kedalaman lokasi penelitian	22
5. Klasifikasi fraksi sedimen berdasarkan ukuran butir	25
6. Konsentrasi <i>trace elements</i> (mg/kg)	29
7. Perbandingan konsentrasi <i>trace elements</i> di berbagai wilayah perairan.....	34
8. Nilai <i>Contamination Factor</i> (CF) dan <i>Pollution Load Index</i> (PLI).....	36
9. Nilai <i>Geoaccumulation Index</i> (Igeo) dan <i>Enrichment Factor</i> (EF).....	37
10. Korelasi ukuran fraksi sedimen dengan <i>trace elements</i> pada sedimen	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Proses pengambilan sampel dan preparasi	60
2. Destruksi sampel	61
3. Persiapan Analisis ukuran fraksi sedimen (<i>Dynamic Light Scattering</i>).....	62
4. Hasil analisis ICP-MS	63
5. Hasil analisis fraksi sedimen	66
6. Perhitungan CF, PLI, Igeo, dan EF	68
7. PCA ukuran fraksi sedimen dan konsentrasi <i>trace elements</i>	74

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Laut merupakan komponen penting pada sistem biogeokimia Bumi yang berfungsi menjaga keseimbangan lingkungan global, terutama sebagai reservoir utama karbon, nutrien. Di dalam sistem tersebut, *trace elements* turut berperan sebagai unsur yang hadir pada konsentrasi sangat rendah di lingkungan laut, terdiri atas logam maupun nonlogam, dan berfungsi sebagai mikronutrien yang mendukung berbagai proses biogeokimia. Kelompok unsur seperti Arsen (As) dan kadmium (Cd), yang memiliki peran signifikan dalam dinamika siklus biogeokimia laut (Seo et al., 2022; López et al., 2023). Di lingkungan laut, dinamika *trace elements* diatur oleh serangkaian proses kompleks yang melibatkan hidrodinamika perairan, interaksi fisika-kimia air laut, serta interaksi antara komponen biotik dan abiotik (Gao et al., 2016). Sebagian besar unsur tersebut tidak hanya berada di kolom air, tetapi juga mengalami pertukaran terus menerus dengan sedimen dasar melalui proses pengendapan dan resuspensi.

Pada zona dasar laut *trace elements* berpartisipasi dalam siklus pengendapan dan resuspensi (Sari et al., 2018). Proses yang terjadi menyebabkan sebagian partikel terakumulasi di dasar perairan, sementara lainnya mengalami remobilisasi kembali ke kolom air tergantung pada kondisi fisik dan kimia perairan. Akumulasi tersebut berlangsung melalui mekanisme adsorpsi pada partikel halus, aglomerasi antarpartikel, serta sedimentasi gravitasional yang mengendapkan material ke dasar laut (Lestari et al., 2018). Proses deposisi menghasilkan rekaman temporal konsentrasi *trace elements* yang terutama di lingkungan laut dalam dan memiliki fungsi penting sebagai arsip lingkungan dan geologis yang sangat berharga

(Budiyanto et al., 2023). Pemahaman tentang dinamika sedimen laut dalam dan *trace elements* yang terkandung di dalamnya menjadi semakin penting seiring dengan peningkatan perhatian terhadap perubahan iklim global dan potensi eksplorasi sumber daya laut dalam.

Trace elements seperti kadmium (Cd) dan arsenik (As) memiliki peran penting dalam sistem laut, baik sebagai mikronutrien esensial (Morel & Price, 2003) maupun sebagai kontaminan toksik pada konsentrasi tinggi (Lahijanzadeh et al., 2019). Pada sedimen laut, unsur-unsur tersebut berperan sebagai indikator penting proses geokimia karena dapat terakumulasi melalui deposisi partikel, aktivitas biogenik maupun pengendapan dari kolom air (ThongraAr et al., 2008). Kadmium (Cd) merupakan unsur yang perilakunya menyerupai fosfat dan cenderung terakumulasi pada fraksi sedimen berukuran halus atau yang kaya bahan organik (Roshan & Devries, 2021). Sementara, arsen (As) di lingkungan sedimen umumnya berasal dari proses alami maupun antropogenik dan cenderung berasosiasi dengan mineral besi atau sulfida (Tchounwou et al., 2012). Meskipun memiliki peran penting dalam sistem biogeokimia laut, akumulasi unsur-unsur jejak tersebut dalam konsentrasi tinggi di sedimen dapat menimbulkan efek toksik terhadap organisme akuatik. Kadmium (Cd) termasuk *trace elements* berbahaya yang mudah terakumulasi dalam jaringan biota dan bersifat karsinogenik (Untu et al., 2022). Arsenik (As) merupakan unsur toksik yang tidak memiliki fungsi biologis, serta dapat mengganggu proses metabolisme organisme laut (Fatoki & Badmus, 2022; Shrivastava et al., 2015). Oleh karena itu, analisis konsentrasi dan distribusi unsur-unsur tersebut dalam sedimen penting dilakukan untuk memahami potensi risiko ekotoksik serta kondisi geokimia lingkungan laut dalam.

Wilayah Selat Makassar hingga perairan Laut Bali merupakan kawasan oseanografi yang strategis karena menjadi jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo) (Gordon et al., 2019) serta pusat aktivitas manusia, seperti pelayaran (Izzati & Marzaman, 2023). Selat Makassar sendiri membentang di antara bagian timur Kalimantan dan bagian barat Sulawesi, kawasan pesisir kedua pulau tersebut menjadi lokasi berbagai aktivitas yang berpotensi mempengaruhi kualitas lingkungan laut. Di Kalimantan Timur, wilayah estuari ditandai oleh pertemuan beberapa aliran sungai besar, seperti Sungai Mahakam, Sungai Bungus, Sungai Sangatta, Su-

ngai Barumuda, Sungai Bungalu, Sungai Karang, dan Sungai Manubar, yang masing-masing memiliki karakteristik hidrologi dan geokimia berbeda (Edward et al., 2021). Aktivitas industri, pertambangan, pertanian, pelabuhan, serta pemukiman di kedua sisi perairan turut meningkatkan potensi masuknya *trace elements* ke lingkungan laut. Sehingga, kajian geokimia sedimen di Selat Makassar penting dilakukan untuk mengevaluasi tingkat pencemaran dan dampaknya terhadap ekosistem perairan.

Sebagian besar penelitian *trace elements* di Indonesia masih berfokus pada wilayah pesisir dan perairan dangkal. Studi di Teluk Buyat, Sulawesi Utara, menemukan konsentrasi As tinggi akibat aktivitas tambang emas (Blackwood & Edinger, 2007) sedangkan di Teluk Jakarta dan Pulau Untung dilaporkan akumulasi Cd pada sedimen pesisir (Kusuma et al., 2015; Alisa et al., 2020). Sebaliknya, kajian terhadap perairan laut dalam masih relatif terbatas, meskipun sejumlah studi internasional menunjukkan variasi konsentrasi *trace elements* yang signifikan, seperti di Palung Kuril-Kamchatka ditemukan Cd 0,40 mg/kg Sattarova dan Aksentov, (2021), sedangkan di *Southwest Sub-basin* ditemukan konsentrasi As 4,83–19,7 µg/g (Cai et al., 2024). Penelitian di perairan dalam Indonesia, seperti di wilayah Simeulue Aceh, juga mendeteksi Cd sebesar 0,02–0,718 mg/kg (Budiyanto et al., 2023). Namun demikian, hasil penelitian Edward et al. (2021) di Selat Makassar menunjukkan bahwa konsentrasi Cd tergolong rendah dibandingkan dengan wilayah laut dalam lainnya. Hingga kini, data sejenis untuk wilayah laut dalam tropis di sepanjang jalur Arlindo masih terbatas, padahal kondisi geomorfologinya serta pengaruh sumber alami dan antropogenik berpotensi besar terhadap akumulasi unsur jejak di sedimen.

Penelitian relevan dengan isu perubahan iklim yang memengaruhi siklus biogeokimia laut, termasuk distribusi *trace elements* ke dasar laut (Zitoun et al., 2024). Aktivitas antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil dan pertambangan juga berpotensi meningkatkan masukan logam ke laut melalui deposisi atmosfer dan aliran sungai (Worakhunpiset, 2018). Meskipun studi Edward et al. (2021) telah memberikan data awal tentang kandungan logam berat di sedimen Selat Makassar, penelitian tersebut masih terbatas dari segi cakupan wilayah, periode pengamatan, dan analisis faktor lingkungan. Selain itu, belum ada kajian yang

menelusuri hubungan antara sumber logam dan dinamika Arus Lintas Indonesia (Arlindo). Kondisi yang terjadi menunjukkan perlunya penelitian lanjutan untuk memahami mekanisme geokimia dan pola akumulasi *trace elements* di laut dalam tropis Indonesia. Data yang dihasilkan dapat menjadi *baseline* penting untuk evaluasi dampak lingkungan potensial dari eksplorasi atau eksploitasi sumber daya laut dalam dimasa depan.

1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

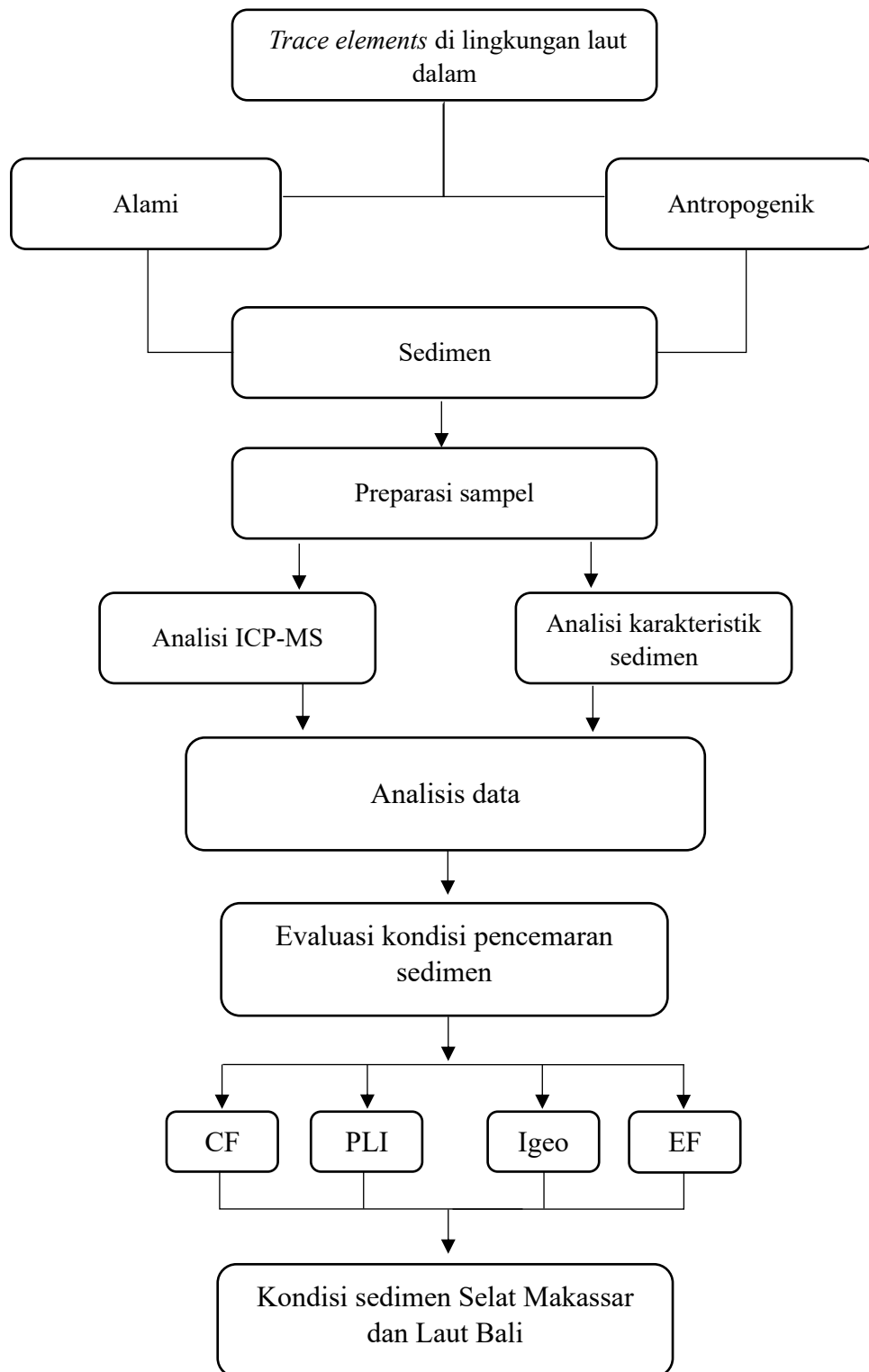
1. menganalisis konsentrasi *trace elements* (^{75}As dan ^{111}Cd) pada sedimen laut dalam dari utara ke selatan di lokasi penelitian.
2. menganalisis tingkat kontaminasi dan mengevaluasi kemungkinan sumber alami maupun antropogenik dari *trace elements* (^{75}As dan ^{111}Cd).

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu geokimia kelautan melalui penyediaan data dasar mengenai sebaran horizontal *trace elements* (^{75}As , dan ^{111}Cd) pada sedimen laut dalam di Selat Makassar dan perairan Laut Bali. Informasi mengenai variasi spasial konsentrasi unsurunsur tersebut dapat menjadi referensi awal bagi kajian geokimia sedimen laut dalam, serta sebagai pembanding untuk penelitian selanjutnya di wilayah perairan yang memiliki karakteristik oseanografi serupa. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat mendukung upaya pengelolaan lingkungan laut melalui penyediaan informasi dasar yang relevan bagi pemantauan kondisi sedimen dan perencanaan konservasi laut di wilayah strategis Indonesia.

1.4 Kerangka Pikir

Pemahaman terhadap keberadaan dan distribusi *trace elements* seperti ^{75}As dan ^{111}Cd dalam sedimen laut dalam sangat penting untuk mengungkap dinamika geokimia yang terjadi di wilayah perairan tropis Indonesia. Wilayah Selat Makassar dan Laut Bali merupakan jalur utama sirkulasi laut dalam melalui Arus Lintas Indonesia (Arlindo) serta berada dekat dengan sumber pencemaran seperti Sungai Mahakam dan aktivitas pelayaran intensif. *Trace elements* dapat masuk ke lingkungan laut melalui proses alamiah seperti pelapukan batuan dan aktivitas vulkanik, maupun melalui aktivitas antropogenik seperti industri dan transportasi laut. Setelah memasuki sistem laut, unsur-unsur akan berinteraksi dengan partikel sedimen, mengalami proses adsorpsi, presipitasi, hingga sedimentasi, dan pada akhirnya terakumulasi di dasar laut. Faktor-faktor seperti ukuran butir sedimen, dan arus bawah laut dapat mempengaruhi tingkat konsentrasi dan sebaran unsur *trace elements*. Oleh karena itu, penelitian mengkaji sebaran horizontal *trace elements* guna memperoleh pemahaman menyeluruh mengenai proses-proses yang mengontrol akumulasinya di lingkungan laut dalam. Informasi sangat diperlukan untuk membentuk dasar ilmiah dalam pemantauan kualitas lingkungan dan pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan. Gambaran penelitian dideskripsikan dalam bentuk kerangka berpikir yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pikir

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Lingkungan Studi

Selat Makassar merupakan jalur laut sempit yang memiliki peran strategis dalam sistem sirkulasi laut di wilayah Indonesia. Selat menghubungkan cekungan Makassar, Laut Bali, dan Laut Jawa, serta berfungsi sebagai koridor utama aliran massa air dari Samudra Pasifik menuju Samudera Hindia melalui Laut Sulawesi (Gordon et al., 2019). Salah satu arus utama yang mengalir melalui selat Makassar adalah Arus Lintas Indonesia (Arlindo), yang membawa air laut hangat, nutrien, serta partikel tersuspensi yang berpotensi mengandung unsur hara dan *trace elements* ke arah selatan. Hal tersebut menjadikan Selat Makassar sebagai wilayah yang penting dalam dinamika oseanografi regional. Secara geomorfologi, Selat Makassar memiliki kondisi alam yang unik dengan topografi bawah laut yang kompleks dan beragam (Natsir et al., 2015). Keanekaragaman batimetri turut mempengaruhi karakteristik sedimen yang terbentuk di sepanjang selat (Widyanto et al., 2014). Secara umum, dinamika arus di Selat Makassar dipengaruhi oleh dua sistem utama, yaitu Arus Lintas Indonesia (Arlindo) dan Arus Monsun Indonesia (ARMADO), yang secara bersama-sama mengatur variasi arus musiman dan sirkulasi regional (Jufri et al., 2020).

Secara morfologi, bagian timur Selat Makassar ditandai oleh keberadaan Palung Makassar yang memiliki kedalaman mencapai lebih dari 2.500–3.000 meter (Satya, 2012 dalam Natsir et al., 2015). Kedalamannya memungkinkan terjadinya akumulasi sedimen laut dalam secara lambat namun kontinu. Sebaliknya, bagian barat Selat Makassar memiliki kedalaman yang lebih dangkal. Sedimen yang terbentuk di wilayah tersebut umumnya didominasi oleh lumpur lempung dan sili-ka biogenik dari organisme seperti diatom dan radiolaria (Natsir et al., 2015). Va-

riasi kandungan material terigen pada sedimen tersebut sangat bergantung pada jarak dari daratan dan sumber aliran sungai. Sesuai dengan prinsip sedimentasi, semakin jauh dari garis pantai menuju laut lepas, maka ukuran sedimen yang terbawa akan semakin halus (Hidayat et al., 2022).

Sebagai pintu gerbang utama masuknya massa air dari Pasifik, Selat Makassar juga menjadi jalur transportasi utama bagi partikel tersuspensi. Variabilitas arus Arlindo yang dipengaruhi oleh fenomena iklim global seperti *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) (Seprianto et al., 2016) dapat memengaruhi pola transportasi dan deposisi *trace elements* di dasar laut. Proses yang terjadi berpotensi menciptakan pola distribusi spasial *trace elements* yang kompleks di sedimen laut dalam.

Input *trace elements* di wilayah penelitian berasal dari berbagai sumber. Secara alami, pelapukan batuan di daratan Kalimantan dan Sulawesi berkontribusi terhadap kandungan *trace elements*. Selain itu, aktivitas hidrotermal dan partikel tersuspensi dari erosi permukaan juga menjadi sumber tambahan. Dari sisi antropogenik, kepadatan lalu lintas kapal di selat meningkatkan risiko pencemaran, baik melalui buangan limbah, tumpahan bahan bakar, maupun cat antikarat (Kamburova et al., 2022; Ni et al., 2022). Di sisi barat, Sungai Mahakam yang bermuara langsung ke Selat Makassar membentuk delta kipas yang luas dan menjadi salah satu jalur utama masuknya sedimen dan unsur kimia dari daratan (Anggara et al., 2021). Kondisi tersebut menjadikan wilayah Selat Makassar tidak hanya penting secara hidrodinamik dan geokimia sebagai tempat bertemunya berbagai input dari daratan dan lautan, tetapi juga sangat relevan dalam konteks penelitian, karena potensi akumulasi *trace elements* di sedimen dasar laut yang mungkin dipengaruhi oleh kombinasi arus laut dalam, input sungai, dan aktivitas antropogenik di sekitarnya (Sindern et al., 2016). Oleh karena itu, memahami karakteristik oseanografi dan geologi wilayah penelitian menjadi kunci dalam menafsirkan distribusi spasial unsur-unsur seperti As dan Cd pada sedimen laut dalam.

2.2 Biogeokimia *Trace Elements*

Trace elements merupakan unsur kimia yang ditemukan dalam jumlah kecil. Sejumlah unsur dalam kelompok tersebut tidak memiliki fungsi biologis dan tergolong nonesensial bagi organisme Chen et al. (2022). Meskipun demikian, Egorova & Ananikov (2017) menegaskan bahwa akumulasi *trace elements* dalam konsentrasi tinggi pada organisme hidup dapat menimbulkan risiko toksisitas. Berbeda dengan polutan organik, *trace elements* bersifat nondegradable sehingga cenderung persisten di lingkungan. Dalam kondisi tertentu, unsur-unsur tersebut dapat bertransformasi menjadi kontaminan stabil yang terakumulasi di sedimen (McComb et al., 2014). *Trace elements* dapat diklasifikasikan menjadi unsur esensial dan nonesensial berdasarkan fungsi biologisnya. Pembahasan difokuskan pada arsen (^{75}As) dan kadmium (^{111}Cd) sebagai perwakilan unsur nonesensial yang berpotensi toksik.

Di lingkungan laut, distribusi dan akumulasi *trace elements* dikendalikan oleh proses biogeokimia yang kompleks sebelum akhirnya terendapkan di sedimen dasar laut. Intensifikasi aktivitas manusia dalam beberapa dekade terakhir, seperti emisi industri, limpasan pertanian, dan pembakaran bahan bakar fosil, telah memodifikasi dinamika tersebut secara signifikan. Chen et al. (2024) mencatat bahwa evolusi aktivitas antropogenik berinteraksi secara sinergis dan mencakup wilayah laut yang sangat luas, termasuk laut dalam. Perubahan berdampak langsung pada peningkatan fluks unsur jejak ke kolom air dan sedimen, sehingga sedimen laut semakin banyak dimanfaatkan sebagai arsip alami untuk menelusuri pengaruh aktivitas manusia terhadap sistem laut dan perubahan lingkungan global (Zhang et al., 2024).

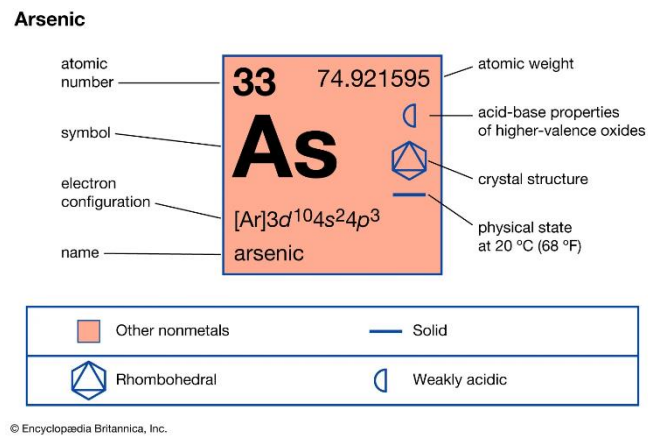
Karakteristik geokimia sedimen laut dalam mencerminkan beragam sumber dan proses alami, serta jejak aktivitas antropogenik. Berdasarkan asalnya, komponen sedimen laut dapat diklasifikasikan berdasarkan asalnya menjadi empat kategori utama litogenik (berasal dari pelapukan batuan), biogenik (berasal dari sisa organisme), dan hidrogenik (terbentuk dari presipitasi kimia di laut) (Li et al., 2022). Komposisi tersebut dipengaruhi oleh proses pelapukan, erosi, aktivitas vulkanik, transport debu atmosfer, presipitasi anorganik, dan kontribusi antropo-

genik (Piarulli et al., 2021). Secara umum, analisis geokimia sedimen mencakup unsur mayor seperti Al, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, dan P yang berkaitan dengan mineral pembentuk sedimen dan batuan induk, serta *trace elements* seperti Cr, V, Cu, Ni, Co, Pb, dan Zn (Palma et al., 2013). Secara historis, unsur jejak didefinisikan sebagai seluruh unsur kimia selain delapan unsur utama pembentuk batuan yang melimpah, yaitu O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, dan Mg (Terzano et al., 2019). Meskipun hadir dalam konsentrasi relatif rendah, unsur-unsur tersebut memiliki signifikansi lingkungan yang tinggi, terutama sebagai indikator perubahan kondisi lingkungan perairan dan potensi toksisitas. Beberapa *trace elements* seperti Cd dan As tergolong sebagai unsur nonesensial karena memiliki sifat toksik dan tidak memiliki fungsi biologis yang diketahui (Fatoki & Badmus, 2022).

2.1.1 Arsen (As)

Arsenik adalah unsur melimpah yang tersebar luas di lingkungan, menempati urutan ke-20 paling melimpah di kerak bumi dan ke-14 di air laut. Diklasifikasikan sebagai metaloid, arsenik memiliki sifat campuran antara logam dan non-logam (Wang et al., 2023). Arsenik dapat terdeteksi pada konsentrasi rendah di berbagai matriks lingkungan (Sari & Kartika, 2022). Meskipun keberadaannya alami, arsenik dikenal sebagai salah satu unsur paling beracun, dengan dampak serius terhadap tumbuhan, hewan, dan manusia. Bentuk anorganiknya, seperti arsenit trivalen (As^{3+}) dan arsenat pentavalen (As^{5+}) (Tchounwou et al., 2012), menunjukkan tingkat toksisitas yang berbeda, yang dipengaruhi oleh tingkat oksidasi dan kelarutannya. Secara biokimia, arsenik bersifat toksik karena kemampuannya berinteraksi dengan gugus sulfhidril pada protein dan enzim, serta menggantikan fosfor dalam berbagai reaksi seluler. Di lingkungan, arsenik terutama berasal dari pelapukan batuan, letusan gunung berapi, aktivitas biologis tertentu, serta dari sumber antropogenik seperti penggunaan herbisida, pestisida, dan pengawet kayu yang mengandung arsenik (Genchi et al., 2022). Karena sifatnya yang tidak dapat terdegradasi dan kelarutannya yang tinggi, arsenik memiliki mobilitas yang luas dalam sistem perairan, menyebabkan terjadinya siklus global (Wang et al., 2023).

yang menjadikan air minum sebagai salah satu jalur utama kontaminasi bagi manusia.

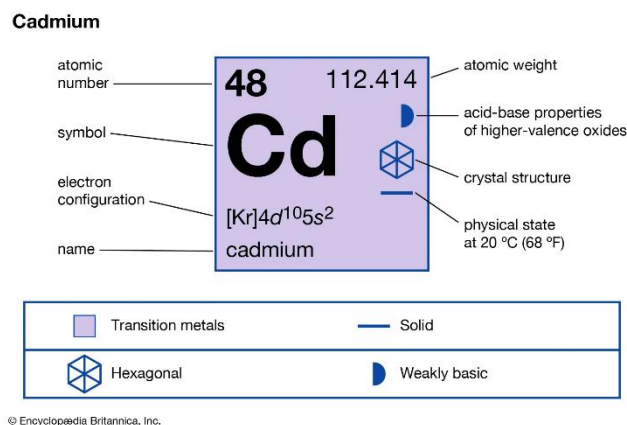


Gambar 2. Karakteristik fisik dan kimia unsur arsenik (As)
Sumber: britannica.com

Setelah arsenik terlepas ke dalam lingkungan laut, arsenik mengalami berbagai reaksi biokimia yang melibatkan proses transportasi spasial dan transformasi bentuk kimia. Dalam sistem perairan, pergerakan dan distribusi arsen tidak hanya dipengaruhi oleh bentuk kimianya, tetapi juga oleh interaksi dengan komponen lingkungan, terutama oksida logam seperti oksida besi hidroksida dan oksida mangan (Smrzka et al., 2019). Arsenik dapat berikatan dengan partikel bermuatan dan mengendap ke dasar perairan sebagai partikel yang terflokulasi. Namun, ketika terjadi perubahan parameter lingkungan seperti potensial redoks, pH, dan kandungan bahan organik dalam sedimen, arsen yang telah mengendap dapat tersuspensi kembali ke kolom air (Wang et al., 2023). Selain perpindahan secara fisik, proses transformasi spesiasi arsenik termasuk oksidasi, reduksi, metilasi, dan demetilasi juga memainkan peran penting dalam menentukan perilaku lingkungan arsenik (Patel et al., 2023). Oleh karena itu, arsenik bersirkulasi dalam ekosistem perairan melalui mekanisme perpindahan spasial dan transformasi kimia, dengan karakteristik yang berbeda antara ekosistem air laut.

2.1.2 Kadmium (Cd)

Kadmium (Cd) merupakan *trace element* nonesensial yang tidak dibutuhkan oleh organisme dan dikategorikan sebagai zat toksik (Luo et al., 2020). Kadmium termasuk dalam kelompok logam transisi yang dapat bertindak sebagai katalis dalam reaksi oksidatif terhadap makromolekul biologis (McComb et al., 2014). Meskipun umumnya tidak memiliki fungsi biologis, satu-satunya peran kadmium yang diketahui adalah sebagai pengganti seng (Zn) di situs katalitik enzim karbonat anhidrase pada diatom laut *Thalassiosira weissflogii* (Lane & Morel, 2000). Toksisitas kadmium sering kali dikaitkan dengan kerusakan jaringan akibat stres oksidatif yang ditimbulkannya. Di lingkungan, keberadaan Cd dapat berasal dari berbagai sumber antropogenik, seperti limbah plastik, pupuk, cat, industri logam, minyak, serta partikel debu atmosfer yang terakumulasi di perairan. Cd juga merupakan salah satu logam yang terdapat dalam endapan bijih laut dalam, yang dapat terlepas ke lingkungan selama aktivitas penambangan laut dalam (Hauton et al., 2017).



Gambar 3. Karakteristik fisik dan kimia unsur kadmium (Cd)
Sumber: britannica.com

Kadmium (Cd) yang memasuki laut umumnya berada dalam bentuk terlarut, terutama sebagai ion bebas Cd²⁺ atau sebagai kompleks dengan klorida dan senyawa organik lemah, tergantung salinitas dan kandungan organik di air laut. Setelah masuk ke laut, sebagian Cd dapat diambil oleh fitoplankton dan mikroorganisme laut pada lapisan permukaan mekanisme yang terjadi menjadikan Cd ber-

perilaku serupa nutrisi, karena distribusinya di laut serupa dengan nutrisi lain seperti fosfat (Cullen & Maldonado, 2013). Ketika fitoplankton dan organisme laut mati atau membentuk partikel detritus, Cd yang terserap dapat ikut tenggelam ke lapisan yang lebih dalam dan akhirnya mengendap di sedimen dasar laut, menjadikan sedimen laut sebagai “reservoir” jangka panjang bagi Cd (Smrzka et al., 2019). Akumulasi tidak hanya berimplikasi pada lingkungan fisik, tetapi juga berdampak langsung pada organisme yang terpapar. Karena Cd mudah terakumulasi dalam rantai makanan, meningkatkan risiko toksisitas bagi organisme akuatik dan manusia. Setelah masuk ke tubuh, Cd tersebar melalui aliran darah dan memasuki sel melalui saluran ion kalsium, mengganggu metabolisme serta merusak struktur jaringan (Zhang et al., 2024).

2.4 Resiko *Trace Elements* di Lingkungan Laut

Trace elements (^{75}As dan ^{111}Cd) dapat dijumpai pada sedimen laut, baik dari sumber alami maupun aktivitas antropogenik seperti limbah industri, limbah daratan, dan deposisi atmosfer. Konsentrasinya mencerminkan kondisi lingkungan dan berpotensi menimbulkan risiko ekologis jangka panjang. Evaluasi tingkat bahaya dilakukan secara kuantitatif menggunakan *Contamination Factor* (CF), *Pollution Load Index* (PLI), *Geoaccumulation Index* (Igeo) dan *Enrichment Factor* (EF) untuk menilai potensi pencemaran logam pada ekosistem laut.

Contamination Factor (CF) merupakan indeks yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi *trace elements* atau unsur pencemar lain dalam media lingkungan seperti sedimen, tanah, dan air. Nilai CF diperoleh dari perbandingan antara konsentrasi unsur dalam sampel dengan nilai latar belakang (*background value*) pada lingkungan yang tidak terkontaminasi. Nilai latar belakang alami biasanya mengacu pada rata-rata kandungan unsur di kerak bumi sebagaimana dilaporkan oleh Turekian & Wedepohl (1961). Indeks berfungsi sebagai indikator sederhana namun representatif untuk menggambarkan tingkat polusi logam dalam sedimen, sebagaimana diperkenalkan oleh Tomlinson (1980) (Lin et al., 2024).

Pollution Load Index (PLI) digunakan untuk menilai tingkat pencemaran total dari beberapa unsur secara simultan. Nilai PLI dihitung dari akar ke- n hasil perkalian nilai CF seluruh unsur yang dianalisis. Interpretasinya bersifat sederhana: nilai $PLI < 1$ menunjukkan kondisi tidak terkontaminasi, sedangkan nilai $PLI > 1$ menandakan adanya tingkat pencemaran yang signifikan. Pendekatan telah banyak diterapkan dan divalidasi dalam berbagai studi polusi sedimen, termasuk oleh (Varol, 2011).

Geoaccumulation Index (Igeo) merupakan parameter kuantitatif yang umum digunakan dalam kajian geokimia lingkungan untuk menilai tingkat pencemaran logam berat pada sedimen (Tan et al., 2024). Indeks menghitung tingkat akumulasi logam dengan membandingkan konsentrasi aktual terhadap nilai latar belakang, yang dikoreksi menggunakan konstanta 1,5 untuk mengakomodasi variasi alami dan kemungkinan pengaruh antropogenik (Rahman et al., 2022).

Enrichment Factor (EF) digunakan untuk mengindikasikan sumber pencemar, apakah berasal dari proses alami atau dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik. Indeks tersebut telah banyak diterapkan sebagai alat diagnostik untuk mengevaluasi status pencemaran berbagai logam jejak di lingkungan sedimen (Feska et al., 2021). Interpretasi nilai EF umumnya mengacu pada klasifikasi sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Nilai EF yang melebihi 1,5 menunjukkan adanya pengayaan unsur yang mengindikasikan kontribusi aktivitas manusia, seperti kegiatan industri, pertambangan, dan pembuangan limbah domestik (Barbieri, 2016). Oleh karena itu, EF berperan penting dalam kajian lingkungan untuk mengidentifikasi, membedakan, dan memetakan sumber serta tingkat pencemaran *trace elements* di suatu wilayah perairan.

Nilai CF, PLI, Igeo dan EF memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat kontaminasi logam berat dalam sedimen. Berdasarkan indeks tersebut, tingkat pencemaran dapat diklasifikasikan ke dalam empat kategori untuk CF dan PLI yang disajikan pada Tabel 1, sedangkan Igeo dan EF terdapat tujuh kategori sebagaimana disajikan pada Tabel 2 (Jorfi et al., 2017; Rahman et al., 2022). Keempat parameter penting dalam pemantauan lingkungan karena mampu mengidentifikasi area yang berpotensi terdampak pencemaran *trace elements* secara efektif dan untuk mengidentifikasi sumber pencemar.

Tabel 1. Klasifikasi CF dan PLI

<i>Contamination Factor (CF)</i>		<i>Pollutant Load Index (PLI)</i>	
$CF < 1$	Rendah	$PLI \leq 1$	Tidak tercemar
$1 < CF < 3$	Sedang	$1 < PLI \leq 2$	Tercemar sedang
$3 < CF < 6$	Cukup tinggi	$2 < PLI \leq 3$	Tercemar berat
$CF > 6$	Tinggi	$PLI > 3$	Tercemar ekstrem

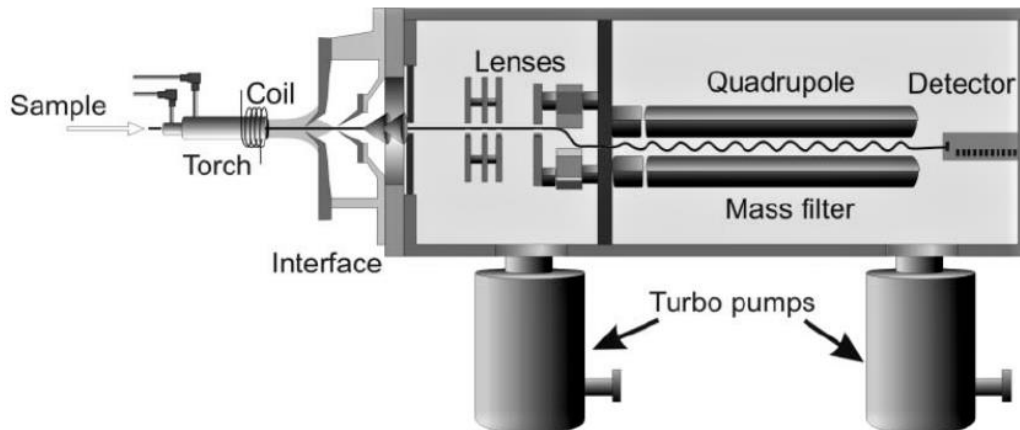
Tabel 2. Klasifikasi Igeo dan EF

<i>Geoaccumulation Index (Igeo)</i>		<i>Enrichment Factor (EF)</i>	
$Igeo < 0$	Tidak tercemar	$EF < 1$	Tidak ada pengayaan
$0 \leq Igeo < 1$	Tidak tercemar hingga cukup tercemar	$CF < 3$	Pengayaan ringan
$1 \leq Igeo < 2$	Cukup tercemar	$3 \leq CF < 5$	Pengayaan sedang
$2 \leq Igeo < 3$	Cukup hingga sangat tercemar	$5 \leq CF < 10$	Pengayaan sedang – berat
$3 \leq Igeo < 4$	Sangat tercemar	$10 \leq CF < 25$	Pengayaan berat
$4 \leq Igeo < 5$	Sangat tercemar hingga tercemar kuat	$25 \leq CF < 50$	Pengayaan sangat berat
$Igeo > 5$	Sangat tercemar kuat	$EF > 50$	Pengayaan Ekstrem

2.5 ICP-MS

Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) merupakan teknik analisis instrumental yang sangat sensitif dan akurat untuk mendeteksi *trace elements* dalam berbagai matriks lingkungan, seperti air laut, sedimen, dan biota (Wilschefski & Baxter, 2019). Metode ICP-MS bekerja dengan mengubah sampel cair menjadi aerosol halus, yang kemudian diionisasi dalam plasma argon berenergi tinggi. Ion-ion yang terbentuk selanjutnya diarahkan ke dalam spektrometer massa untuk dipisahkan berdasarkan rasio massa terhadap muatan (m/z) dan dideteksi sebagai sinyal elektronik. ICP-MS terdiri atas enam komponen utama, yaitu sistem pengenalan sampel, plasma, antarmuka, optik ion, penganalisis massa, dan detektor. Prinsip kerjanya memungkinkan pengukuran konsentrasi unsur hingga tingkat sangat rendah, mencapai nanogram per liter (ng/L), sehingga sangat ideal

untuk analisis *trace elements* dalam studi geokimia lingkungan (Li et al., 2023). Analisis pada penelitian yang dilakukan berdasarkan pedoman *EPA Method 6020A*, sedangkan proses digesti sampel sedimen menggunakan metode *EPA 3050–3052* untuk menentukan kandungan total *trace elements*.



Gambar 4. Skema penampang ICP-MS
Sumber: Wilschefski & Baxter, 2019

Pada skema ICP-MS, sampel cair terlebih dahulu dimasukkan ke dalam *torch* dan diionisasi dalam plasma argon bersuhu tinggi yang dihasilkan oleh RF *coil*, unsur dalam sampel teratomisasi dan terionisasi menjadi ion bermuatan positif. Ion yang terbentuk kemudian diarahkan melalui *interface* dan lensa menuju *quadrupole*, yang memisahkan ion berdasarkan rasio massa terhadap muatan. Ion yang lolos dideteksi oleh detektor dan diubah menjadi sinyal listrik yang sebanding dengan konsentrasi unsur, dengan sistem vakum dijaga oleh *turbo pump*.

Keunggulan utama dari *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS) dibandingkan teknik analisis lainnya terletak pada sensitivitasnya yang tinggi, kemampuan analisis *multi element* secara simultan, serta kecepatan dalam memperoleh hasil. Kemampuan untuk mengukur beberapa unsur sekaligus dalam satu kali analisis menjadikan ICP-MS sangat efisien, terutama dalam studi lingkungan yang kompleks. Selanjutnya, memiliki batas deteksi yang sangat rendah, waktu analisis yang singkat, serta persiapan sampel yang relatif sederhana. ICP-

MS juga mendukung *throughput* sampel yang tinggi, menjadikannya sangat cocok digunakan di laboratorium dengan volume analisis besar. Meskipun biaya awal dan operasionalnya cukup tinggi serta memerlukan keahlian teknis, keuntungan yang ditawarkan dalam hal sensitivitas, jangkauan unsur yang luas, dan efisiensi menjadikan ICP-MS sebagai pilihan utama dalam analisis lingkungan maupun klinis (Wilschefski & Baxter, 2019).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Waktu dan tempat penelitian adalah

3.1.1 Waktu Penelitian

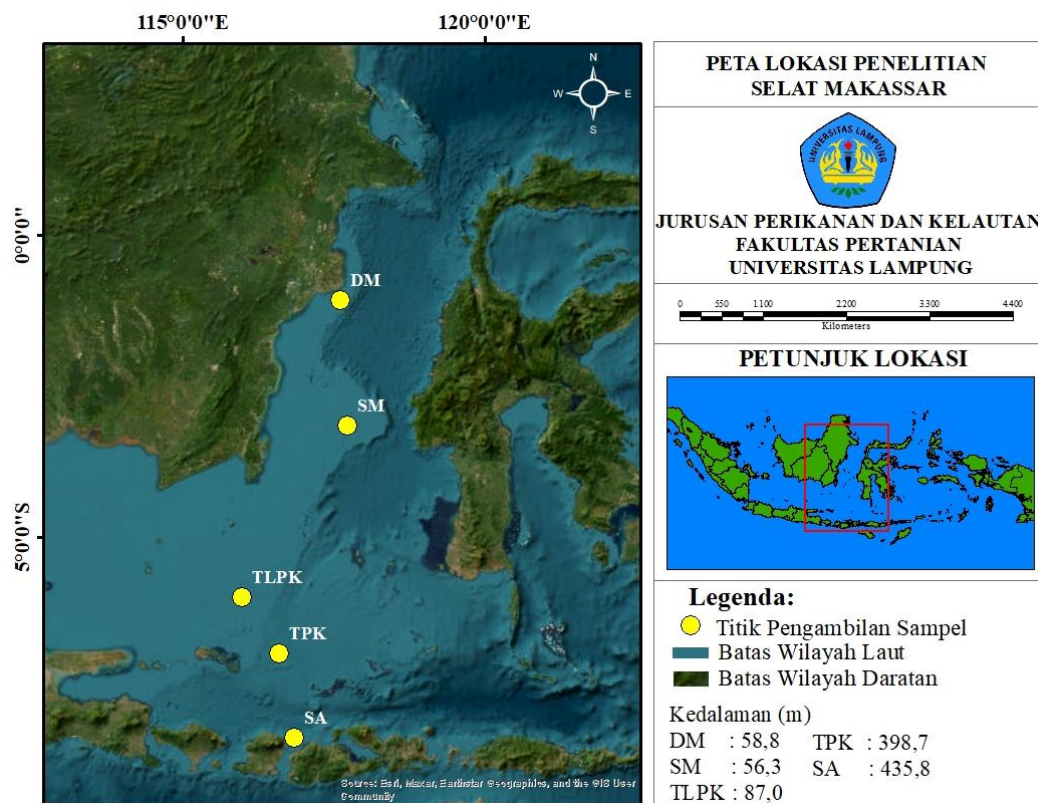
Penelitian dilaksanakan dari bulan Februari hingga Juli 2025.

3.1.2 Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), tepatnya di Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRT-KMMN), Laboratorium Radiomarine, yang berlokasi di Jl. Raya Serpong, Muncul, Kec. Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten, Indonesia. Lokasi pengambilan sampel berada di perairan Selat Makassar yang terhubung dengan Laut Jawa hingga Laut Bali.

Penelitian mencakup wilayah perairan strategis Indonesia yang berada pada jalur Arus Lintas Indonesia (Arlindo), meliputi lima stasiun pengamatan di Selat Makassar (Gambar 5). Stasiun 1 (DM) berlokasi di bagian tengah Selat Makassar dan berada relatif dekat dengan kawasan delta besar di pesisir Kalimantan Timur, sehingga karakteristik perairannya berpotensi dipengaruhi oleh masukan material dari sistem estuari di wilayah tersebut. Stasiun 2 (SM) terletak pada zona tengah Selat Makassar yang, menurut Jufri et al. (2020), dicirikan oleh arus berenergi tinggi dengan kecepatan rata-rata 0,32–0,37 m/s, dipengaruhi oleh aliran massa air dari sisi barat Pulau Sulawesi. Stasiun 3 (TLPK) dan Stasiun 4 (TPK)

terletak di bagian selatan Selat Makassar dan berada dalam wilayah Perairan Masalembo. Stasiun 3 berada di timur laut Pulau Kangean, sedangkan stasiun 4 berada di sebelah timur Pulau Kangean. Kawasan masalembo memiliki dinamika oseanografi yang kompleks akibat pertemuan massa air dari Laut Jawa, Selat Makassar, dan Laut Flores. Pada periode tertentu, wilayah tersebut juga dipengaruhi gelombang tinggi serta pusaran arus yang kuat (Wangdiarta et al., 2024). Sementara itu, Stasiun 5 (SA) berada di perairan Laut Bali bagian timur, berdekatan dengan mulut Selat Alas antara Pulau Lombok dan Sumbawa, dan kawasan tersebut dipengaruhi transport massa air dari Laut Flores sebagai bagian dari sistem Arlindo. Peta lokasi pengambilan sampel disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta lokasi pengambilan sampel

3.2 Bahan dan Alat

Bahan dan alat yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut:

3.2.1 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian adalah sedimen laut sebanyak ± 1 kg per stasiun, aquadest, (Asam Nitrat) HNO_3 65% (Merck), (Asam Klorida) HCl 38% (Merck), (Hidrogen Peroksida) H_2O_2 30% (Merck).

3.2.2 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut:

Tabel 3. Alat yang digunakan pada penelitian

Alat	Spesifikasi	Fungsi
Kapal	Kapal ekspedisi GEOMARIN III	Untuk pengangkutan peralatan survei dan perangkat lainnya ke lokasi studi.
Box core	<i>Stainless stell</i>	Untuk mengambil sedimen dengan lapisan vertikal yang utuh di dasar laut dalam.
Erlenmeyer	Pyrex, 100 mL	Untuk pencampuran larutan.
Labu ukur	Pyrex, 100 mL	Untuk memanaskan bahan atau larutan.
<i>Hotplate multi strirer</i>	Dlab	Untuk memanaskan sampel.
Oven	Labtech Clean Air Oven Lco-3350h	Untuk mengeringkan sampel sedimen.
Kertas saring	Whatman No. 42	Untuk memisahkan padatan dari cairan dalam suatu larutan.
Spatula	<i>Stainless stell</i>	Untuk mengambil sampel.
Alu	Porselen	Untuk menggerus sampel.
Mortar	Porselen	Untuk menghaluskan sampel.
Baki/nampan	Plastik anti statis polistirena	Untuk wadah sampel saat dimasukkan ke dalam oven.
Tabung Mikrocentrifuge	Brand, 1,5-2,0 mL	Untuk menampung sampel cair dengan volume kecil.
Timbangan analitik	Ohaus, ketelitian 0,0001 g	Untuk menimbang sampel.

Alat	Spesifikasi	Fungsi
ICP-MS (<i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>)	Thermo Scientific icap RQ	Untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi unsur dalam sampel.
DLS (<i>Dynamic Light Scattering</i>)	Horiba	Untuk menganalisis ukuran partikel.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan utama, dimulai dari pengambilan sampel di lapangan, diikuti dengan proses preparasi sampel untuk memastikan kondisi sampel sesuai standar analisis. Selanjutnya dilakukan tahap destruksi sampel guna menguraikan matriks sampel sehingga unsur yang dianalisis dapat terukur secara akurat. Tahap terakhir adalah analisis laboratorium, yang mencakup pengukuran parameter sesuai tujuan penelitian serta validasi kualitas data yang dihasilkan.

3.3.1 Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada lima stasiun penelitian (Gambar 5) menggunakan kapal riset yang merupakan bagian dari Ekspedisi GEOMARIN III yang merupakan kapal milik Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia dalam program *The Research on Transport Indonesian Seas, Upwelling, and Mixing Physics* (TRIUMPH). Sampel sedimen diperoleh menggunakan *box corer* untuk mendapatkan sedimen permukaan dasar laut. Setelah *box corer* diangkat ke atas kapal, subsampel diambil menggunakan *scoop*, kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik *ziplock* dan disimpan dalam *cool box* sebelum dianalisis lebih lanjut di laboratorium. Metode digunakan untuk memperoleh sampel sedimen permukaan yang representatif dari zona deposisi.

Tabel 4. Titik koordinat dan kedalaman lokasi penelitian

Kode sampel	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	Kedalaman (m)
ST 1 (DM)	117°36'43.01"E	1°4'39.66"S	58,8
ST 2 (SM)	117°43'18.19"E	3°9'32.31"S	56,3
ST 3 (TLPK)	115°58'27.38"E	5°59'29.56"S	87,0
ST 4 (TPK)	116 35'30.91"E	6 55'37.24"E	398,7
ST 5 (SA)	116°50'12.25"E	8°18'38.47"S	435,8

3.3.2 Preparasi Sampel

Sampel sedimen yang telah diambil kemudian ditempatkan pada wadah baki yang telah dilapisi plastik. Selanjutnya, sampel tersebut dikeringkan dalam oven pada suhu 70°C sampai sediment kering dan beratnya konstan. Setelah proses pengeringan selesai, sampel sedimen dihaluskan menggunakan teknik penggerusan dan ditimbang untuk menentukan massa keringnya. Akhirnya, sampel yang telah dipreparasi tersebut disimpan dalam kantong plastik ziplok untuk menjaga integritasnya sebelum analisis lebih lanjut.

3.3.3 Destruksi

Preparasi sampel sedimen dilakukan dengan menggunakan metode destruksi basah (Wulandari & Sukesu, 2013). Sebanyak 2 g sampel sedimen dimasukkan ke dalam labu Erlenmeyer. Sampel tersebut kemudian ditambahkan larutan campuran asam yang terdiri dari asam nitrat (HNO_3) 65% dan asam klorida (HCl) 38% dengan rasio 3:1, sebanyak 10 ml. Proses pemanasan dilakukan menggunakan *hot plate* pada suhu 70-80°C selama 2 jam. Selanjutnya, 6 ml hidrogen peroksida (H_2O_2) 30% ditambahkan ke dalam sampel, diikuti dengan pemanasan lanjutan pada suhu 70°C selama 1 jam. Hasil destruksi disaring menggunakan kertas saring *Whatman No. 42*, dan filtrat yang diperoleh diencerkan dalam labu ukur 100 ml dengan aquades hingga tanda batas (Kamzati et al., 2020).

3.4 Analisis Sampel

Analisis kandungan *trace elements* pada sedimen dilakukan menggunakan metode *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS) berdasarkan standar pengujian EPA *Method* 6020A dan seluruh rangkaian analisis dilakukan di Laboratorium Mineral Terpadu dan Pati Lampung – BRIN, yang diakses melalui layanan E – Layanan Sains. Metode yang digunakan memungkinkan analisis *multi-element* dalam konsentrasi sangat rendah pada sampel lingkungan, termasuk air, sedimen, lumpur, dan limbah padat. Sebelum dianalisis dengan ICP-MS, sedimen mengalami proses digesti asam untuk melarutkan unsur-unsur logam dari matriks padat ke dalam larutan.

3.5 Analisis Karakteristik Sedimen

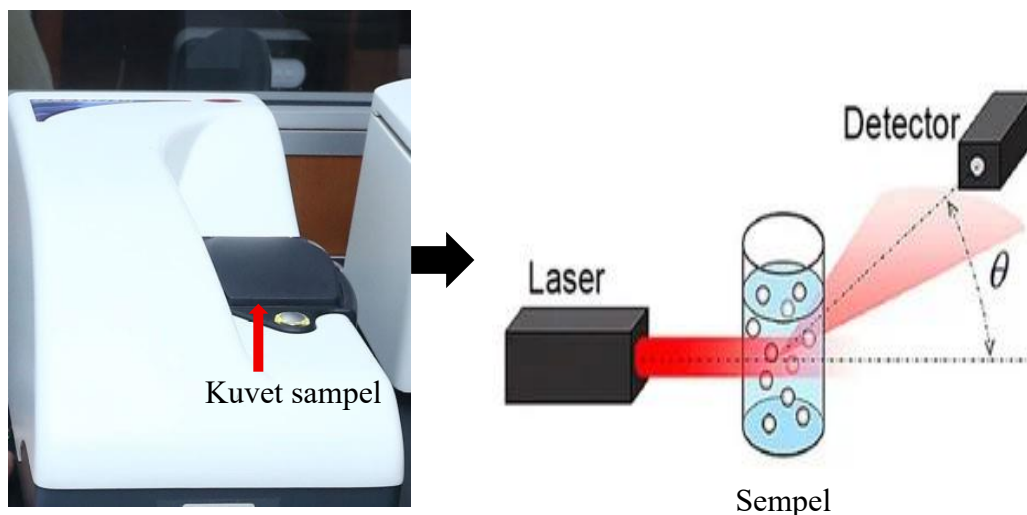
Analisis karakteristik sedimen merupakan tahap penting dalam penelitian karena memberikan informasi dasar mengenai sifat serta komposisi material yang diteliti. Untuk menilai tingkat pencemaran logam dalam sedimen laut, dilakukan estimasi status kontaminan geokimia lingkungan menggunakan beberapa indeks, yaitu *particulate size analyser*, *Contamination Factor* (CF), *Pollution Load Index* (PLI), *Geoaccumulation Index*, dan *Enrichment Factor* (EF). Pendekatan yang digunakan untuk menginterpretasikan intensitas, distribusi, dan potensi risiko pencemaran *trace elements* terhadap lingkungan perairan.

3.5.1 *Particulate Size Analyser*

Analisis ukuran partikel dilakukan dengan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS), sebagaimana banyak dilaporkan dalam literatur untuk karakterisasi partikel mikro hingga nano (Riveli, 2023). Sebanyak 0,025 g sedimen kering dari setiap lokasi didispersikan ke dalam 10 mL akuades untuk membentuk suspensi, kemudian dihomogenkan dan dimasukkan ke dalam tabung mikrosentrifus untuk proses persiapan analisis oleh DLS. Sampel yang telah dipreparasi kemudian dikirim ke LTKMRKN – Laboratorium Bahan Maju Nuklir, Tangerang Selatan, Ban-

ten melalui layanan E – Layanan Sains BRIN untuk dianalisis menggunakan *Dynamic Light Scattering* (DLS). Analisis ukuran partikel sedimen menggunakan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS) dengan rentang pengukuran $\pm 0,1-8 \mu\text{m}$. Klasifikasi fraksi sedimen mengacu pada Blott & Pye (2012), yang membagi sedimen menjadi beberapa kelompok, yaitu *boulder* (63–2.000 mm), *gravel* (2–63 mm), *sand* (63–2.000 μm), *silt* (2–63 μm), dan *clay* (63–2.000 nm). Klasifikasi digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik distribusi ukuran butiran sedimen, termasuk subfraksi yang disajikan pada Tabel 5. Analisis ukuran butiran bertujuan untuk memahami karakteristik fisik sedimen yang berpotensi mempengaruhi proses pengendapan serta distribusi dan akumulasi logam berat di wilayah penelitian.

Prinsip kerja *Dynamic Light Scattering* (DLS) dengan mengukur fluktuasi intensitas cahaya hambur yang dihasilkan ketika sinar laser diarahkan ke partikel yang tersuspensi dalam suatu medium cair. Fluktuasi yang terjadi akibat gerak Brown partikel, di mana partikel berukuran lebih kecil bergerak lebih cepat dibandingkan partikel berukuran besar. Fluktuasi tersebut diolah menggunakan fungsi autokorelasi untuk memperoleh koefisien difusi partikel, yang kemudian dikonversi menjadi diameter hidrodinamik melalui persamaan Stokes–Einstein, sehingga ukuran partikel dalam larutan dapat ditentukan secara tidak langsung (Leong et al., 2018).



Gambar 6 Skema penampang *dynamic light scattering*
Sumber: Loya et al., 2024

Pada Gambar 6 menunjukkan konfigurasi pengukuran DLS, di mana sampel dimasukkan ke dalam kuvet dan ditempatkan pada ruang pengukuran alat untuk menjaga kestabilan lintasan laser dan sudut deteksi. Sinar laser diarahkan ke sampel, kemudian cahaya yang dihamburkan oleh partikel ditangkap oleh detektor pada sudut tertentu (θ). Informasi cahaya hambur yang terdeteksi digunakan sebagai dasar analisis untuk menentukan karakteristik ukuran partikel dalam suspensi.

Tabel 5. Klasifikasi fraksi sedimen berdasarkan ukuran butir (Blott & Pye, 2012)

Subkalsifikasi	Size	Fraksi Sedimen
<i>Very large boulder</i>	1.000 - 2.000 mm	<i>Boulder</i>
<i>Large boulder</i>	500 - 1.000 mm	
<i>Medium boulder</i>	250 - 500 mm	
<i>Small boulder</i>	125 - 250 mm	
<i>Very small boulder</i>	63 - 125 mm	
<i>Very coarse gravel</i>	31,5 - 63 mm	<i>Gravel</i>
<i>Coarse gravel</i>	16 - 31,5 mm	
<i>Medium gravel</i>	8 - 16 mm	
<i>Fine gravel</i>	4 - 8 mm	
<i>Very fine gravel</i>	2 - 4 mm	
<i>Very coarse sand</i>	1.000 - 2.000 μm	<i>Sand</i>
<i>Coarse sand</i>	500 - 1000 μm	
<i>Medium sand</i>	250 - 500 μm	
<i>Fine sand</i>	125 - 250 μm	
<i>Very fine sand</i>	63 - 125 μm	
<i>Very coarse silt</i>	31,5 - 63 μm	<i>Silt</i>
<i>Coarse silt</i>	16 - 31,5 μm	
<i>Medium silt</i>	8 - 16 μm	
<i>Fine silt</i>	4 - 8 μm	
<i>Very fine silt</i>	2 - 4 μm	
<i>Very coarse clay</i>	1000 - 2000 nm	<i>Clay</i>
<i>Coarse clay</i>	500 - 1000 nm	
<i>Medium clay</i>	250 - 500 nm	
<i>Fine clay</i>	125 - 250 nm	
<i>Very fine clay</i>	63 - 125 nm	

3.5.2 Contamination Factor (CF)

Faktor kontaminasi (C_f^i) merupakan indikator sederhana namun akurat untuk menilai tingkat polusi logam dalam sedimen (Rahman et al., 2022).

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_b} \quad (1)$$

Keterangan:

C_f^i = Faktor kontaminasi

C_i = Konsentrasi *trace elements* yang terukur pada penelitian

C_b = Latar belakang geokimia

3.5.3 Pollution Load Index (PLI)

Indeks Beban Polusi (*Pollution Load Index* (PLI) adalah matrik yang dikembangkan oleh Tomlinson 1980 untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi logam dan *trace elements* secara menyeluruh dalam sedimen (Rahman et al., 2022).

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_{i1} \times CF_{i2} \times CF_{i3} \times \dots \times CF_{in})} \quad (2)$$

Keterangan:

PLI = Indeks Beban Polusi

CF_{i1} = Faktor Kontaminasi pada logam dan *trace elements*

n = Jumlah logam dan *trace elements* yang dianalisis

3.5.4 Geoaccumulation Index (Igeo)

Indeks Geoakumulasi (Igeo) indeks yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi logam pada sedimen dengan membandingkan konsentrasi saat ini dengan tingkat *background* (Rahman et al., 2022).

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right) \quad 3$$

Keterangan:

C_n = Kandungan logam berat

B_n = *Geochemical background*

1,5 = Konstanta

3.5.5 *Enrichment Factor (EF)*

Perhitungan *Enrichment Factor*, *Sample* merepresentasikan nilai yang diukur dari unsur yang diteliti, sedangkan *background* merepresentasikan konsentrasi alami unsur pada lingkungan yang belum terpengaruh oleh pencemaran dan diperoleh dari literatur. Unsur Fe digunakan sebagai unsur normalisasi dalam perhitungan *Enrichment Factor* karena distribusinya tidak berkorelasi dengan *trace elements* lainnya dan memiliki konsentrasi alami yang relatif tinggi, sehingga relatif tidak diperkaya oleh aktivitas antropogenik dan representatif sebagai unsur referensi dalam sedimen (Elias et al., 2018). Besi (Fe) dipilih sebagai unsur referensi karena kontribusinya terhadap sedimen didominasi oleh masukan alami (98%) (Feska et al., 2021). Untuk menilai tingkan pengayaan *trace elements* dapat menggunakan *Enrichment Factor* sebagaimana dikemukakan oleh Rahman et al. (2022).

$$EF = \frac{\left(\frac{C_i}{C_{ref}}\right)_{sample}}{\left(\frac{C_i}{C_{ref}}\right)_{background}} \quad 4$$

Keterangan:

C_i = Konsentrasi unsur yang sedang diteliti (mg/kg)

C_{ref} = Konsentrasi unsur yang digunakan sebagai acuan (mg/kg)

3.6 Analisis Statistik

Analisis korelasi pearson dilakukan menggunakan perangkat lunak *XL-STAT* (Putri, 2016). Matriks korelasi pearson digunakan untuk menilai kekuatan dan arah hubungan antar parameter, serta mengidentifikasi keterkaitan sumber yang serupa. Nilai korelasi yang signifikan secara statistik ditentukan pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).

3.7 Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode analisis deskriptif, yaitu metode yang menyajikan ringkasan informasi serta penjelasan data secara sistematis dan rinci (Martias, 2021). Lebih lanjut, penelitian juga didukung oleh

studi kepustakaan, melalui pengumpulan data, referensi pustaka, dan informasi yang relevan dengan isu penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian “Sebaran Horizontal *Trace Elements* (^{75}As dan ^{111}Cd) Pada Sedimen Laut Dalam: Studi Kasus Di Selat Makassar Dan Laut Bali” dapat disimpulkan bahwa:

1. Konsentrasi *trace elements* (^{75}As , dan ^{111}Cd) pada sedimen laut dalam di lima titik pengamatan menunjukkan tren yang berbeda dari utara ke selatan. Perbedaan tren menegaskan bahwa distribusi *trace elements* di wilayah studi dikendalikan oleh kombinasi sumber material dan proses oseanografi. Konsentrasi ^{75}As mengalami penurunan ke arah selatan, hingga ± 6 kali lipat lebih kecil pada lokasi dengan konsentrasi terendah, sementara pada lokasi paling selatan konsentrasi As menurun sekitar 1,6 kali lebih rendah dibandingkan wilayah paling utara, yang mencerminkan dominasi masukan material daratan dari Delta Mahakam dan kecenderungan As untuk terakumulasi di wilayah dekat sumber. Sebaliknya, konsentrasi ^{111}Cd meningkat ke arah selatan hingga sekitar 12 kali lipat pada lokasi dengan konsentrasi tertinggi, yang menunjukkan bahwa Cd lebih mudah tertransport ke wilayah yang lebih jauh dari daratan sehingga terakumulasi pada wilayah selatan.
2. Hasil analisis indeks-indeks pencemaran menunjukkan bahwa sedimen di lokasi penelitian berdasarkan sebaran horizontal dari utara hingga selatan secara umum masih tergolong tidak tercemar atau berada pada kondisi alami. Namun demikian, pada beberapa lokasi teridentifikasi adanya pengaruh antropogenik, yaitu pada wilayah utara untuk unsur As serta pada wilayah selatan untuk unsur Cd.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya, pengambilan sampel disarankan dilakukan pada musim yang berbeda untuk melihat pengaruh pola arus musiman terhadap distribusi unsur. Selain itu, analisis tambahan seperti *total organic carbon* (TOC) direkomendasikan untuk memperkuat interpretasi mekanisme pengikatan *trace elements*.

DAFTAR PUSTAKA

- Alisa, C. A. G., Albirqi, M. S., & Faizal, I. (2020). Kandungan timbal dan kadmium pada air dan sedimen di perairan Pulau Untung Jawa, Jakarta. *Jurnal Akuatika Indonesia*, 5(1), 21–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.24198/jaki.v5i1.26523>
- Anggara, G., Mandang, I., & Rahmiati. (2021). Studi karakteristik sedimen di estuari Delta Mahakam Kalimantan Timur. *Jurnal Geosains Kutai Basin*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.30872/geofisunmul.v4i1.460>
- Atmadipoera, A. S., Horhoruw, S. M., Purba, M., & Dwi, Y. N. (2016). Variasi pasial dan temporal Arlindo di Selat Makassar. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 8(1), 299–320. http://itk.fpik.ipb.ac.id/ej_itkt81
- Balwa, A. F., Nurjazuli, & Joko, T. (2016). Studi beban pencemaran logam berat kadium (Cd) pada ballast water kapal barang dan kapal penumpang di Pelabuhan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(4), 2356–3346. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkm>
- Barbieri, M. (2016). The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5(1). <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>
- Blackwood, G. M., & Edinger, E. N. (2007). Mineralogy and trace element relative solubility patterns of shallow marine sediments affected by submarine tailings disposal and artisanal gold mining, Buyat-Ratototok district, North Sulawesi, Indonesia. *Environmental Geology*, 52(4), 803–818. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0517-5>
- 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>
- Budiyanto, F., Harmesa, Lestari, Prayitno, H. B., Putra, P. S., & Nugroho, S. H. (2023). Metals profile in deep-sea sediment from an active tectonic region around Simeulue Island, Aceh, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 114983. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114983>

- Budko, D. F., Lobus, N. V., & Vedenin, A. A. (2021). Dataset on the content of major, trace, and rare-earth elements in the bottom sediments and bivalve mollusks of the Kara Sea (Arctic Ocean). *Data in Brief*, 36, 107087. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107087>
- Buyang, S., Yi, Q., Cui, H., Wan, K., & Zhang, S. (2019). Distribution and adsorption of metals on different particle size fractions of sediments in a hydrodynamically disturbed canal. *Science of the Total Environment*, 670, 654–661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.276>
- Cai, Z., Wang, X., Zhong, L., Zhang, C., & Sui, X. (2024). The sources and transport model of deep-sea sediment in the Southwest Sub-basin of the South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1440886. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1440886>
- Chaeran Harcici, M. (2017). Misteri segitiga “Masalembo” merupakan segitiga bermudadi wilayah Indonesia. *Jurnal Saintek Maritim*, 16(2), 122–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.33556/jstm.v0i2.145>
- Chen, C., Lyu, F., Wu, B., & Wu, Z. (2024). Development of a deep-sea in-situ anion analyzer for marine biogeochemical cycle observation. *Deep-Sea Research Part I*, 208, 104326. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104326>
- Chen, J., Xue, X., & Li, M. (2022). Editorial: trace elements in the environment: Biogeochemical cycles and bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, 13(2), 1056528. <https://doi.org/doi:10.3389/fmicb.2022.1056528>
- Chen, X., Wang, Y., Hou, Q., Liao, X., Zheng, X., Dong, W., Wang, J., & Zhang, X. (2024). Significant correlations between heavy metals and prokaryotes in the Okinawa trough hydrothermal sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 479, 135657. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135657>
- Cullen, J. T., & Maldonado, M. T. (2013). Biogeochemistry of cadmium and its release to the environment. *Metal Ions in Life Sciences*, 11, 31–62. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_2
- Dekov, V. M., Van Put, A., Eisma, D., & Van Grieken, R. (1999). Single particle analysis of suspended matter in the Makasar Strait and Flores Sea with particular reference to tin-bearing particles. *Journal of Sea Research*, 41(1), 35–53. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(98\)00035-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1385-1101(98)00035-5)
- Dickson, A. J., Bryan, A. L., George, E., Henderson, G. M., Porcelli, D., Rolison, J., Slomp, C. P., Middag, R., & Stirling, C. H. (2025). Behaviour of cadmium isotopes in sulfidic waters and sediments of the Black Sea: implications for global cadmium cycling and the application of cadmium isotopes as a paleo-oceanographic proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 662, 119408. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119408>

- Dierrisska, P. H. N., Maslukah, L., Rochaddi, B., & Zainuri, M. (2024). Distribusi logam berat (Pb dan Cd) sedimen di Perairan Pantai Loji Pekalongan, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 13(3), 568–576. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i3.45041>
- Edward, Helfinalis, Budiyanto, F., & Witasari, Y. (2021). Heavy metals concentration in sediment of Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 925(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/925/1/012019>
- Egorova, K. S., & Ananikov, V. P. (2017). Toxicity of metal compounds: knowledge and myths. *Organometallics*, 36(21), 4071–4090. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.7b00605>
- Elias, M. S., Ibrahim, S., Samuding, K., Rahman, S. A., & Wo, Y. M. (2018). Assessment of toxic elements in sediments of Linggi River using NAA and ICP-MS techniques. *MethodsX*, 5, 454–465. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.001>
- Everaarts, J. M. (1989). Heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in sediment of the Java Sea, estuarine and coastal areas of East Java and some deep-sea areas. *Netherlands Journal of Sea Research*, 23(4), 403–413. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0077-7579\(89\)90024-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0077-7579(89)90024-0)
- Fatoki, J. O., & Badmus, J. A. (2022). Arsenic as an environmental and human health antagonist: a review of its toxicity and disease initiation. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100052>
- Feska, S., Muslim, & Haeruddin. (2021). Enrichment factor for cadmium and lead in sediment of Gembong Estuary, Bekasi, Indonesia. *International Journal of Engineering Science Technologies*, 5(2), 38–44. <https://doi.org/10.29121/ijolest.v5.i2.2021.157>
- Gao, L., Wang, Z., Shan, J., Chen, J., Tang, C., Yi, M., & Zhao, X. (2016). Distribution characteristics and sources of trace metals in sediment cores from a trans-boundary watercourse: an example from the Shima River, Pearl River Delta. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.08.020>
- Gastaldo, R. A., Allen, G. P., & Huc, A. Y. (1995). The tidal character of fluvial sediments of the modern Mahakam River delta, Kalimantan, Indonesia. *Spec. Pubis Int. Ass. Sediment*, 24, 171–181. <https://doi.org/10.1002/9781444304138.ch11>
- Genchi, G., Lauria, G., Catalano, A., Carocci, A., & Sinicropi, M. S. (2022). Arsenic: a review on a great health issue Worldwide. *Applied Sciences*, 12(12), 6184. <https://doi.org/10.3390/app12126184>

- Gordon, A. L., Napitu, A., Huber, B. A., Gruenburg, L. K., Pujiana, K., Agustadi, T., Kuswardani, A., Mbay, N., & Setiawan, A. (2019). Makassar Strait throughflow seasonal and interannual variability: an overview. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 3724–3736. <https://doi.org/10.1029/2018JC014502>
- Gordon, A. L., Susanto, R. D., & Ffield, A. (1999). Throughflow with in Makassar Strait. *Geophysical Research Letters*, 26(21), 3325–3328. <https://doi.org/10.1029/1999GL002340>
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hasanah, S. R. (2019). Analisis potensi Kepulauan Kangean menuju Kabupaten Kepulauan. *Swara Bhumi*, 1(3), 244–249. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/swara-bhumi/article/view/29947/27449>
- Hauton, C., Brown, A., Thatje, S., Mestre, N. C., Bebianno, M. J., Martins, I., Bettencourt, R., Canals, M., Sanchez-Vidal, A., Shillito, B., Ravaux, J., Zbinden, M., Duperron, S., Mevenkamp, L., Vanreusel, A., Gambi, C., Dell’Anno, A., Danovaro, R., Gunn, V., & Weaver, P. (2017). Identifying toxic impacts of metals potentially released during deep-sea mining-A synthesis of the challenges to quantifying risk. *Frontiers in Marine Science*, 4, 368. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00368>
- Hidayat, R. A., Maslukah, L., & Zainuri, M. (2022). Sebaran ukuran butir di Perairan Kemuja, Karimunjawa. *Indonesian Journal of Oceanography*, 04(02), 12–21. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce>
- Indriyani, L., Bana, S., Adi Surya, R., & Teke, J. (2020). Environmental quality analysis in Kendari Bay in terms of heavy metal pollutants : Pb, Cu and Zn. *GeoEco Journal*, 6(1), 12–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.20961/ge.v6i1.39258>
- Izzati, R. N., & Marzaman, A. P. (2023). Efektivitas sistem navigasi dan manajemen lalu lintas laut di Selat Makassar dalam mendukung perdagangan maritim internasional. *Triwikrama: Jurnal Ilmu Sosial*, 5(9), 110–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.6578/triwikrama.v5i9.7664>
- Johnson, J. E., Webb, S. M., Ma, C., & Fischer, W. W. (2016). Manganese mineralogy and diagenesis in the sedimentary rock record. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173, 210–231. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.027>
- Jorfi, S., Maleki, R., Jaafarzadeh, N., & Ahmadi, M. (2017). Pollution load index for heavy metals in Mian-Ab plain soil, Khuzestan, Iran. *Data in Brief*, 15, 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.10.017>

- Jufri, A., Ihsan, Muh. N., & Sahabuddin. (2020). Distribusi spasial dan temporal arus permukaan laut di Selat Makassar. *SIGANUS: Journal of Fisheries and Marine Science*, 1(2), 69–73.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31605/siganus.v1i2.655>
- Jung, J. M., Kim, C. J., Chung, C. S., Kim, T., Gu, H. S., Kim, H. E., & Choi, K. Y. (2024). Applying new regional background concentration criteria to assess heavy metal contamination in deep-sea sediments at an ocean dumping site, Republic of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116065.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116065>
- Kamburova, K., Boshkova, N., Boshkov, N., & Radeva, T. (2022). Hybrid zinc coating with CuO nanocontainers containing corrosion inhibitor for combined protection of mild steel from corrosion and biofouling. *Coatings*, 12(9), 1254. <https://doi.org/10.3390/coatings12091254>
- 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>
- Ketris, M. P., & Yudovich, Y. E. (2009). Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
- Kusuma, A. H., Prartono, T., Atmadipoera, A. S., & Arifin, T. (2015). Sebaran logam berat terlarut dan terendapkan di perairan Teluk Jakarta pada bulan September. *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 6(1), 41–49.
<https://doi.org/https://doi.org/10.24319/jtpk.6.41-49>
- Lahijanzadeh, A. R., Rouzbahani, M. M., Sabzalipour, S., & Nabavi, S. M. B. (2019). Ecological risk of potentially toxic elements (PTEs) in sediments, seawater, wastewater, and benthic macroinvertebrates, Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 377–389.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.030>
- Lane, T. W., & Morel, F. M. M. (2000). A biological function for cadmium in marine diatoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9), 4627–4631. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.090091397>
- Lenstra, W. K., Séguret, M. J. M., Behrends, T., Groeneveld, R. K., Hermans, M., Witbaard, R., & Slomp, C. P. (2020). Controls on the shuttling of manganese over the northwestern Black Sea shelf and its fate in the euxinic deep basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 273, 177–204.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.031>

- Leong, S. S., Ng, W. M., Lim, J. K., & Yeap, S. P. (2018). Dynamic light scattering: effective sizing technique for characterization of magnetic nanoparticles. In: Sharma, S. (eds), *Handbook of materials characterization*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_3
- Lestari, Budiyanto, F., & Hindarti, D. (2018). Speciation of heavy metals Cu, Ni and Zn by modified BCR sequential extraction procedure in sediments from Banten Bay, Banten Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012059>
- Li, C., Zhan, L., & Lu, H. (2022). Mechanisms for overpressure development in marine sediments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 490. <https://doi.org/10.3390/jmse10040490>
- Li, W., Zhang, J., Li, H., Wu, Z., He, X., Ran, L., Wiesner, M. G., & Chen, J. (2023). Different source contributions of bioactive trace metals in sinking particles in the Northern South China Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2125. <https://doi.org/10.3390/jmse11112125>
- Lin, C., Lin, H., He, X., Chen, J., Sun, X., Liang, Q., & Liu, Y. (2024). Geochemical characteristics and provenance of metals in surface sediments of hydrate area, Northern South China sea. *Continental Shelf Research*, 280, 105298. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105298>
- López, S. M., Banegas García, A., Pérez Sirvent, C., Martínez Sánchez, M. J., & Esteban Abad, M. A. (2023). The arsenic biogeochemical cycle: a review. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 4(4), 1–30. <https://doi.org/10.21926/aeer.2304051>
- Luo, W., Wang, D., Xu, Z., Liao, G., Chen, D., Huang, X., Wang, Y., Yang, S., Zhao, L., Huang, H., Li, Y., Wei, W., Long, Y., & Du, Z. (2020). Effects of cadmium pollution on the safety of rice and fish in a rice-fish coculture system. *Environment International*, 143, 105898. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105898>
- Marjan, E., Abdolreza, K., & Faramarz, M. (2016). Assessment of metal pollution in the Anzali Wetland sediments using chemical partitioning method and pollution indices. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(10), 28–36. <https://doi.org/10.1007/s13131-016>
- Martias, L. D. (2021). Statistika deskriptif sebagai kumpulan informasi. *Jurnal Ilmu Perpustakaan Dan Informasi*, 16(1), 40. <https://doi.org/10.14421/fhrs.2021.161.40-59>

- Maslukah, L. (2013). Hubungan antara konsentrasi logam berat Pb, Cd, Cu, Zn dengan bahan organik dan ukuran butir dalam sedimen di Estuari Banjir Kanal Barat, Semarang. *Buletin Oseanografi Marina*, 2, 55–62.
<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>
- Masuda, H., Yoshinishi, H., Fuchida, S., Toki, T., & Even, E. (2019). Vertical profiles of arsenic and arsenic species transformations in deep-sea sediment, Nankai Trough, offshore Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0269-y>
- McComb, J., Alexander, T. C., Han, F. X., & Tchounwou, P. B. (2014). Understanding biogeochemical cycling of trace elements and heavy metals in estuarine ecosystems. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 05(03) 1000e148. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000e148>
- Morel, F. M. M., & Price, N. M. (2003). The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. *Science*, 300(5621), 944–947.
<https://doi.org/10.1126/science.1083545>
- Natsir, S. M., Firman, A., Riyantini, I., & Nurruhwati, D. I. (2015). Struktur komunitas foraminifera pada sedimen permukaan dan korelasinya terhadap kondisi lingkungan perairan lepas pantai Balikpapan, Selat Makassar. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(2), 671–680.
http://itk.fpik.ipb.ac.id/ej_itkt72
- Neff, J. M. (2002). *Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-008043716-3/50006-3>
- Ni, W., Li, P., Zhu, Y., Di, Z., Guo, L., & Liu, Y. (2022). Comparative study of anti-corrosion properties and lifespan prediction model for inorganic zinc-rich coating and thermal-spray zinc coating. *Coatings*, 12(4), 505.
<https://doi.org/10.3390/coatings12040505>
- Palma, C., Oliveira, A., Valença, M., Cascalho, J., Pereira, E., Lillebø, A. I., Duarte, A. C., & Pinto de Abreu, M. (2013). Major and minor element geochemistry of deep-sea sediments in the azores platform and southern seamount region. *Marine Pollution Bulletin*, 75(1–2), 264–275.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.002>
- Patel, K. S., Pandey, P. K., Martín-Ramos, P., Corns, W. T., Varol, S., Bhattacharya, P., & Zhu, Y. (2023). A review on arsenic in the environment: contamination, mobility, sources, and exposure. *RSC Advances*, 13(13), 8803–8821. <https://doi.org/10.1039/d3ra00789h>
- Paul, S. A. L., 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>

- Pham Van, C., Gourgue, O., Sassi, M., Hoitink, A. J. F., Deleersnijder, E., & Soares-Frazão, S. (2016). Modelling fine-grained sediment transport in the Mahakam land–sea continuum, Indonesia. *Journal of Hydro-Environment Research*, 13, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2015.04.005>
- Piarulli, S., Hansen, B. H., Ciesielski, T., Zocher, A. L., Malzahn, A., Olsvik, P. A., Sonne, C., Nordtug, T., Jenssen, B. M., Booth, A. M., & Farkas, J. (2021). Sources, distribution and effects of rare earth elements in the marine environment: current knowledge and research gaps. *Environmental Pollution*, 291, 118230. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118230>
- Popoola, S. O., Nubi, A. O., Unyimadu, J. P., Ladigbolu, I. A., Fabunmi, I., Udochu, U., Nwamba, E., Oba, I. A., Mordi, S., & Adamu, S. (2023). Pollution indices and ecological risk assessment of major elements and trace metals in the marine sediment of the western Nigeria continental shelf, Gulf of Guinea. *Scientific African*, 22, e01923. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01923>
- Putri, A. D. D. (2016). Kandungan logam berat kadmium (Cd), tembaga (Cu), dan seng (Zn) pada air dan sedimen perairan Pelabuhan Kamal, Kabupaten Bangkalan, Madura (No Publikasi 134900)[Skripsi, Universitas Brawijaya]. Repository Universitas Brawijaya.
- Que, W., Yi, L., Wu, Y., & Li, Q. (2024). Analysis of heavy metals in sediments with different particle sizes and influencing factors in a mining area in Hunan Province. *Scientific Reports*, 14(1), 20318. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71502-3>
- Rachman, R. A., Armono, H. D., Wibowo, M., Istiyanto, D. C., & Widagdo, A. B. (2023). Study of sediment distribution in Tanjung Pasir Banten based on bed load data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1224(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1224/1/012022>
- Rachman, R. A., & Wibowo, M. (2019). Kajian karakteristik sedimen dasar laut untuk mendukung rencana pembangunan Pelabuhan Patimban. *Jurnal Geologi Kelautan*, 17(2), 99–112. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.32693/jgk.17.2.2019.592>
- Rahman, M. S., Ahmed, Z., Seefat, S. M., Alam, R., Islam, A. R. M. T., Choudhury, T. R., Begum, B. A., & Idris, A. M. (2022). Assessment of heavy metal contamination in sediment at the newly established tannery industrial Estate in Bangladesh: a case study. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 4, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.10.001>
- Rifardi. (2012). *Ekologi sediment laut modern* (Edisi Revisi). UR Press.

- Riveli, N. (2023). Simulasi dynamic light scattering untuk menyelidiki pengaruh panjang gelombang terhadap akurasi pengukuran ukuran partikel. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, 13(01), 39–44.
<https://doi.org/https://doi.org/10.24198/jme.v13i01.49188>
- Loya, J. R., Lerma, M., & Gardea-Torresdey, J. L. (2024). Dynamic light scattering and its application to control nanoparticle aggregation in colloidal systems: a review. *Micromachines*, 15(1), 24.
<https://doi.org/10.3390/mi15010024>
- Roshan, S., & DeVries, T. (2021). Global contrasts between oceanic cycling of cadmium and phosphate. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(6), 1–18.
<https://doi.org/10.1029/2021GB006952>
- Ross, P. M., Battershill, C. N., & Loomb, C. (2016). The wreck of the MV Rena: spatio-temporal analysis of ship derived contaminants in the sediments and fauna of Astrolabe Reef. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 50(1), 87–114. <https://doi.org/10.1080/00288330.2015.1077873>
- Sari, A. H. W., & Kartika, I. W. D. (2022). Peringatan dini keberadaan arsen (As) pada air dan sedimen di Hilir Sungai Tukad Badung, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(2), 197–201.
<https://doi.org/10.24843/jmas.2022.v08.i02.p04>
- Sarı, E., Çağatay, M. N., Acar, D., Belivermiş, M., Kılıç, Ö., Arslan, T. N., Tutay, A., Kurt, M. A., & Sezer, N. (2018). Geochronology and sources of heavy metal pollution in sediments of Istanbul Strait (Bosporus) outlet area, SW Black Sea, Turkey. *Chemosphere*, 205, 387–395.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.096>
- Sattarova, V., Aksentov, K., Astakhov, A., Shi, X., Hu, L., Alatorsev, A., Mariash, A., & Yaroshchuk, E. (2021). Trace metals in surface sediments from the Laptev and East Siberian Seas: levels, enrichment, contamination assessment, and sources. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 112997.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112997>
- Sattarova, V. V., & Aksentov, K. I. (2021). Trace metals in deep-sea sediments collected from Kuril Basin (Sea of Okhotsk) and Kuril-Kamchatka Trench area. *Marine Pollution Bulletin*, 164, 112055.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112055>
- Seo, H., Kim, G., Kim, T., Kim, I., Ra, K., & Jeong, H. (2022). Trace elements (Fe, Mn, Co, Cu, Cd, and Ni) in the East Sea (Japan Sea): distributions, boundary inputs, and scavenging processes. *Marine Chemistry*, 239, 104070.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2021.104070>

- Seprianto, A., Kunarso, & Wirasatriya, A. (2016). Studi pengaruh EL Nino Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD) terhadap variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a di Perairan Karimunjawa. *Jurnal Oseanografi*, 5(4), 452–461. <https://doi.org/http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Shrivastava, A., Ghosh, D., Dash, A., & Bose, S. (2015). Arsenic contamination in soil and sediment in India: sources, effects, and remediation. In *Current Pollution Reports*, 1(1), 35–46. Springer. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0004-2>
- Sindern, S., Tremöhlen, M., Dsikowitzky, L., Gronen, L., Schwarzbauer, J., Siregar, T. H., Ariyani, F., & Irianto, H. E. (2016). Heavy metals in river and coast sediments of the Jakarta Bay region (Indonesia) geogenic versus anthropogenic sources. *Marine Pollution Bulletin*, 110(2), 624–633. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.003>
- Smrzka, D., Zwicker, J., Bach, W., Feng, D., Himmeler, T., Chen, D., & Peckmann, J. (2019). The behavior of trace elements in seawater, sedimentary pore water, and their incorporation into carbonate minerals: a review. *Facies*, 65(4), 41. <https://doi.org/10.1007/s10347-019-0581-4>
- Storms, J. E. A., Hoogendoorn, R. M., Dam, R. A. C., Hoitink, A. J. F., & Kroonenberg, S. B. (2005). Late-holocene evolution of the Mahakam delta, East Kalimantan, Indonesia. *Sedimentary Geology*, 180(3), 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.08.003>
- Sulistyono. (2015). Kegiatan usaha industri migas hubungannya dengan dampak dan tanggung jawab kelestarian lingkungan hidup. *Swara Parta*, 5(2), 23–30. <https://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/138>
- Tan, S., Zhang, T., & Yang, Z. (2024). Vertical distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s pollution in a sediment profile from Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117089>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Terzano, R., Denecke, M. A., Falkenberg, G., Miller, B., Paterson, D., & Janssens, K. (2019). Recent advances in analysis of trace elements in environmental samples by X-ray based techniques (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 91(6), 1029–1063. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-0605>

- Thongra-Ar, W., Musika, C., Wongsudawan, W., & Munhapol, A. (2008). Heavy metals contamination in sediments along the Eastern Coast of the Gulf of Thailand. *EnvironmentAsia*, 1(1), 37–45.
<https://doi.org/https://doi.org/10.14456/ea.2008.5>
- 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)
- Untu, I. M., Rarumangkay, J., Hanna, Y., & Kowel, S. (2022). *Bioakumulasi senyawa xenobiotik*. CV. Patra Media Grafindo.
- Varol, M. (2011). Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 355–364.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.051>
- Viñas, L., Pérez-Fernandez, B., Besada, V., Gago, J., McHugh, B., & Parra, S. (2023). PAHs and trace metals in marine surficial sediments from the Porcupine Bank (NE Atlantic): a contribution to establishing background concentrations. *Science of the Total Environment*, 856, 159189.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159189>
- Wang, N., Ye, Z., Huang, L., Zhang, C., Guo, Y., & Zhang, W. (2023). Arsenic Occurrence and cycling in the aquatic environment: a comparison between freshwater and seawater. *Water*, 15(1), 147.
<https://doi.org/10.3390/w15010147>
- Wangdiarta, F. P., Wirasatriya, A., & Harsono, H. (2024). Respon suhu permukaan laut (SPL) terhadap ENSO di Perairan Masalembo periode 2010-2019. *Indonesian Journal of Oceanography*, 06(1), 57–71.
<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce>
- Widyanto, P., Suseno, H., dan Murdahayu Makmur. (2014). Pengaruh batimetri perairan terhadap distribusi plutonium 239/240 (^{239/240}Pu) dalam sedimen di Perairan Gresik. *Jurnal Oseanografi*, 3(3), 448–453. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Wilschefski, S. C., & Baxter, M. R. (2019). Inductively coupled plasma mass spectrometry: introduction to analytical aspects. *The Clinical Biochemist Reviews*, 40(3), 115–133. <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024>
- Worakhunpiset, S. (2018). Trace elements in marine sediment and organisms in the gulf of Thailand. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 810. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040810>

- Wulandari, E. A., & Sukesi. (2013). Preparasi penentuan kadar logam Pb, Cd dan Cu dalam nugget ayam rumput laut merah (*Eucheuma cottonii*). *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2(2), 2337–3520.
<https://doi.org/https://doi.org/10.12962/j23373520.v2i2.3729>
- Zhang, S., Li, Q., Zou, Y., Liu, B., Yang, J., Zheng, H., & Liu, G. (2024). Using isotopic lead and strontium in sediments to trace natural and anthropogenic sources in the Bohai Sea. *Scientific Reports*, 14(1), 30267.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-81493-w>
- Zhang, X., Zhang, W., Zhao, L., Zheng, L., Wang, B., Song, C., & Liu, S. (2024). Mechanisms of gills response to cadmium exposure in greenfin horse-faced filefish (*Thamnaconus septentrionalis*): oxidative stress, immune response, and energy metabolism. *Animals*, 14(4), 561.
<https://doi.org/10.3390/ani14040561>
- Zitoun, R., Marcinek, S., Hatje, V., Sander, S. G., Völker, C., Sarin, M., & Omanović, D. (2024). Climate change driven effects on transport, fate and biogeochemistry of trace element contaminants in coastal marine ecosystems. *Communications Earth and Environment*, 5(1), 560.
<https://doi.org/10.1038/s43247-024-01679-y>