

# e-book-Biomonitoring Logam Berat\_v.2.0\_Unesco\_FULL\_ISB

N

*by --*

---

**Submission date:** 18-Jun-2024 07:51PM (UTC+0700)

**Submission ID:** 2404767917

**File name:** k-Biomonitoring\_Logam\_Berat\_v.2.0\_Unesco\_FULL\_ISBN\_buku\_ke\_5.pdf (4.74M)

**Word count:** 32854

**Character count:** 219092



# **Biomonitoring** *Logam Berat*

di Muara Sungai Menggunakan  
Ikan Sebagai Bioindikator

**Dr. Drs. Krisdianto, M.Sc.**

**Dr. Drs. Heri Budi Santoso, M.Si.**

**Dr. Ir. Rizmi Yunita, M.Si.**



1

**Biomonitoring**

**Logam Berat**

di Muara Sungai Menggunakan Ikan  
sebagai Bioindikator

**Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

**Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

**Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

<sup>1</sup>

# Biomonitoring Logam Berat

di Muara Sungai Menggunakan Ikan  
sebagai Bioindikator

<sup>1</sup>  
Dr. Drs. Krisdianto, M.Sc.  
Dr. Drs. Heri Budi Santoso, M.Si  
Dr. Ir. Rizmi Yunita, M.Si

 deepublish  
*Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.*

1

**BIOMONITORING LOGAM BERAT DI MUARA SUNGAI MENGGUNAKAN  
IKAN SEBAGAI BIOINDIKATOR**

3

**Krisdianto, dkk**

Desain Cover :

**Rulie Gunadi**

Sumber :

www.shutterstock.com (Rich Carey)

Tata Letak :

**Joko Waluyo**

Proofreader :

**Mira Muarifah**

Ukuran :

**xii, 130 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN :

**978-623-02-7494-7**

Cetakan Pertama :

**November 2023**

Hak Cipta 2023, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2023 by Deepublish Publisher**

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**

**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)

[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)

E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

## PRAKATA

---

Dalam jejaring kehidupan yang rumit yang ada di estuari kita, keberadaan dan akumulasi logam berat menjadi perhatian yang terus berkembang. Sebagai seorang Professor dengan reputasi tinggi, peneliti profesional, dan ahli di bidang ekologi, ekologi air, ekotoksikologi, kimia, dan biologi ikan, saya sangat menyadari pentingnya memahami dampak logam berat terhadap ekosistem muara. Buku ini berusaha menyajikan eksplorasi yang komprehensif dan terkini tentang penggunaan ikan sebagai bioindikator untuk memantau kontaminasi logam berat di muara sungai.

Lingkungan estuaria memainkan peran penting dalam mendukung beragam flora dan fauna, memberikan manfaat ekologis yang penting dan berfungsi sebagai penghubung antara ekosistem darat dan laut. Namun, aktivitas antropogenik telah menyebabkan pelepasan logam berat ke dalam ekosistem yang rapuh ini, dengan konsekuensi yang merugikan bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Sangatlah penting bagi kita untuk menggunakan strategi *biomonitoring* yang efektif untuk menilai tingkat pencemaran logam berat dan implikasinya terhadap kehidupan akuatik dan masyarakat manusia.

Buku ini bertujuan untuk menjadi sumber referensi yang berharga bagi para mahasiswa, peneliti, manajer lingkungan, dan pembuat kebijakan yang terlibat dalam bidang ekologi, ekologi air, ekotoksikologi, kimia, dan biologi ikan. Buku ini akan memberikan penjelasan yang sistematis dan kohesif mengenai metodologi, studi kasus, dan wawasan ilmiah terkini terkait penggunaan ikan sebagai bioindikator untuk *biomonitoring* logam berat di muara.

## KATA PENGANTAR

---

Dalam jejaring kehidupan yang rumit di estuari, keberadaan dan akumulasi logam berat menjadi perhatian yang serius. Sebagai guru besar dan peneliti di bidang manajemen sumberdaya perairan, saya menyadari pentingnya memahami dampak buruk logam berat pada ekosistem muara sungai atau estuari. Buku referensi ini berusaha menyajikan eksplorasi yang komprehensif dan terkini tentang pemanfaatan ikan sebagai bioindikator untuk membantu evaluasi atau asesmen kontaminasi logam berat di ekosistem estuari.

Lingkungan estuari memainkan peranan penting dalam mendukung biodiversitas flora dan fauna, memberikan manfaat ekologis yang penting dan sebagai penghubung antara ekosistem darat dan laut. Namun, aktivitas antropogenik telah menyebabkan pelepasan logam berat ke dalam ekosistem yang rapuh ini, dengan konsekuensi merugikan bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Sangatlah penting dan urgen bagi kita untuk menggunakan strategi biomonitoring yang efektif untuk mengevaluasi tingkat pencemaran logam berat dan implikasinya terhadap kehidupan biota akuatik dan manusia.

Buku ini bertujuan untuk menjadi sumber referensi yang berharga bagi mahasiswa, peneliti, pengelola lingkungan dan pembuat kebijakan yang terlibat dalam bidang ekologi, ekologi perairan, ekotoksikologi, kimia lingkungan dan biologi ikan. Buku ini akan memberikan penjelasan yang sistematis dan kohesif mengenai metodologi, studi kasus dan wawasan ilmiah terkini terkait penggunaan ikan sebagai bioindikator untuk biomonitoring pencemaran logam berat di muara sungai.

Banjarbaru, 10 Oktober 2023



49  
Prof. Dr. Ir. H. Mijani Rahman, M.Si  
Kepala Pusat Penelitian  
Lingkungan Hidup ULM



Segala puji kami haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan segala anugerah dan karunia-Nya. Dalam rangka mencerdaskan dan memuliakan umat manusia dengan penyediaan serta pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan industri *processing* berbasis sumber daya alam (SDA) Indonesia, Penerbit Deepublish dengan bangga menerbitkan buku dengan judul ***Biomonitoring Logam Berat di Muara Menggunakan Ikan sebagai Bioindikator***.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis, Dr. Heri Budi Santoso, M.Si., yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pembaca, mampu berkontribusi dalam mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta mengoptimalkan pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi di tanah air.

Hormat Kami,

**Penerbit Deepublish**

## DAFTAR ISI

---

<b>PRAKATA</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR PENERBIT</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>BAB 1 PROLOG</b> .....	<b>1</b>
1.1. Estuari/Muara sebagai Ekosistem yang Penting secara Ekologis.....	2
1.2. Logam Berat di Muara: Sumber, Keberadaan, dan Dampaknya.....	6
1.3. Penggunaan Ikan sebagai Bioindikator Pemantauan Logam Berat .....	10
<b>BAB 2 Landasan Ekotoksikologi</b> .....	<b>14</b>
2.1. Prinsip-prinsip Ekotoksikologi dalam Sistem Estuaria .....	14
2.2. Toksisitas Logam Berat terhadap Organisme Akuatik.....	17
2.3. Proses Bioakumulasi dan Biomagnifikasi .....	20
<b>BAB 3 Ekologi Ikan di Muara</b> .....	<b>27</b>
3.1. Keanekaragaman Hayati dan Peran Ekologis Ikan .....	27
3.2. Habitat dan Persebaran Ikan di Muara .....	30
3.3. Adaptasi Fisiologis Ikan terhadap Cekaman Logam Berat .....	33
<b>BAB 4 Teknik <i>Biomonitoring</i> Logam Berat</b> .....	<b>38</b>
4.1. Strategi Pengambilan Sampel Air dan Sedimen .....	38
4.2. Pengambilan Sampel Jaringan Ikan: Metode Tidak Mematikan dan Mematikan.....	40
4.3. Teknik Analisis untuk Analisis Logam Berat .....	43

<b>BAB 5</b>	<b>Bioindikator dalam Tindakan: Studi Kasus .....</b>	<b>49</b>
5.1.	Tanggapan Spesifik Spesies terhadap Kontaminasi Logam Berat.....	49
5.2.	Pola Spasial dan Temporal Bioakumulasi Logam Berat .....	52
5.3.	Pemantauan Jangka Panjang dan Analisis Kecenderungan .....	55
<b>BAB 6</b>	<b>Risiko Ekologi dan Implikasi Kesehatan Manusia.....</b>	<b>61</b>
6.1.	Pendekatan Penilaian Risiko Ekologis .....	61
6.2.	Transfer Trofik Logam Berat ke Tingkat Trofik yang Lebih Tinggi .....	63
6.3.	Risiko Kesehatan Manusia Berkaitan dengan Ikan yang Terkontaminasi Logam Berat .....	66
<b>BAB 7</b>	<b>Strategi Mitigasi dan Manajemen .....</b>	<b>72</b>
7.1.	Kerangka Kerja Regulasi untuk Pengendalian Pencemaran Logam Berat .....	72
7.2.	Teknik Remediasi dan Restorasi.....	75
7.3.	Praktik Berkelanjutan dan Perspektif Masa Depan .....	78
<b>BAB 8</b>	<b>SIMPULAN .....</b>	<b>85</b>
8.1.	Rekapitulasi Temuan Utama .....	85
8.2.	Pentingnya Ikan sebagai Bioindikator .....	87
8.3.	Ajakan untuk Bertindak untuk Memastikan Kesehatan dan Ketahanan Estuaria .....	89
58	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>97</b>
	<b>Glosarium .....</b>	<b>115</b>
	<b>INDEKS .....</b>	<b>124</b>
	<b>PROFIL PENULIS .....</b>	<b>126</b>

## DAFTAR GAMBAR

---

Gambar 1 a. Ekosistem estuari .....	6
Gambar 1 b. Ekosistem estuari Kuala Lupak Barito Kuala, Kalimantan Selatan .....	6
Gambar 2. Sumber-sumber logam berat (Naija & Yalcin, 2023) .....	9
Gambar 3. Model konseptual dari variabel dan proses fisika, kimia, dan biologi untuk perilaku dan toksisitas logam. Perairan estuaria dicirikan oleh gradien fisikokimia yang kuat, misalnya salinitas, densitas, kecepatan aliran, dan komposisi bahan tersuspensi, yang berpengaruh penting pada nasib logam. Masukan air tawar (kepadatan rendah) dan air asin (kepadatan tinggi) biasanya menghasilkan sirkulasi muara, dengan gradien salinitas vertikal dan pembilasan air tawar terutama di permukaan. Kekeruhan di <i>estuary</i> dihasilkan dari debit sungai dan gradien salinitas. Kontaminasi logam di muara bawah tanah terjadi karena perbedaan gradien sehingga mempengaruhi mobilisasi logam. Pada sistem muara bawah tanah yang tidak terkurung, intrusi air asin berasal dari laut, sementara air tawar mengalir dari sisi kontinental. ....	9
Gambar 4. <i>Biomonitoring</i> pencemaran logam berat menggunakan ikan sebagai bioindikator. Bioakumulasi logam berat akibat aktivitas pertambangan dan industri, serta pengaruhnya terhadap rantai makanan di perairan.....	13
Gambar 5. Rute penyerapan logam yang tertelan. Logam yang tertelan kemudian diserap melalui saluran pencernaan (GI/gastrointestinal) atau tidak terserap. Logam dapat diekskresikan melalui mukosa usus dan sebagian dapat diserap kembali; bagian yang tersisa masuk ke dalam tinja. Ekskresi logam dapat terjadi melalui empedu dan	

cairan pankreas dan kemudian diserap kembali atau diekskresikan ke dalam tinja. Ketika diserap kembali, masuk ke dalam sirkulasi enterohepatik. Ekskresi saluran pencernaan bersih adalah bagian dari saluran pencernaan yang tidak diserap kembali, tetapi diekskresikan melalui tinja. Kandungan tinja adalah jumlah dari logam yang telah diekskresikan oleh saluran pencernaan dan logam yang tidak terserap..... 18

- Gambar 6. Efek logam berat dan pestisida pada ikan ..... 19
- Gambar 7. Perbedaan antara bioakumulasi dan biomagnifikasi logam berat pada ikan ..... 26
- Gambar 8. Ketersediaan hayati logam berat (HM) dalam rantai makanan ..... 66
- Gambar 9. Sumber-sumber utama produksi Cd dan Hg serta keracunan pada manusia yang menyebabkan kardiotoxicitas dan neurotoxicitas ..... 71



## BAB 1 PROLOG

---

Estuari atau Muara merupakan ekosistem yang sangat penting secara ekologis, berfungsi sebagai zona transisi yang vital di mana sungai air tawar bertemu dengan air laut yang asin. Ekosistem unik ini mendukung keanekaragaman flora dan fauna yang luar biasa sekaligus memberikan manfaat ekologis yang tak ternilai, sehingga menjadikannya sebagai titik-titik ekologis yang sangat penting. 1)

Salah satu peran penting yang dimainkan oleh muara adalah sebagai tempat berkembang biak dan pembibitan yang kaya bagi berbagai spesies air. Perpaduan antara air tawar dan air asin menciptakan lingkungan yang unik yang mendukung reproduksi dan pertumbuhan banyak spesies. Ikan, krustasea, dan moluska bergantung pada muara untuk bertelur dan membesarkan anak-anaknya. Sifat estuari yang terlindung, dengan rawa-rawa, dataran pasang surut, dan hutan bakau, menyediakan tempat berlindung bagi tahap kehidupan yang rentan ini. Oleh karena itu, muara sungai sangat penting untuk menjaga populasi yang sehat dari berbagai spesies yang penting secara komersial dan ekologis. 2)

Selain itu, muara bertindak sebagai koridor migrasi yang penting bagi ikan dan organisme lainnya. Banyak spesies yang mengandalkan muara sebagai tempat persinggahan selama migrasi jarak jauh. Rute migrasi ini memungkinkan pertukaran materi genetik antara populasi yang berbeda, sehingga meningkatkan keragaman dan ketahanan genetik. Muara juga menawarkan sumber daya makanan yang melimpah, menarik spesies yang bermigrasi untuk mencari makanan. Jaringan muara yang rumit di seluruh dunia menopang jaring makanan yang kompleks, dengan interaksi predator-mangsa dan kaskade trofik yang berkontribusi pada kesehatan dan produktivitas ekosistem laut yang berdekatan secara keseluruhan. 3)

Selain itu, muara memainkan peran penting dalam siklus nutrisi dan retensi sedimen. Aliran air tawar yang konstan ke muara membawa banyak nutrisi, termasuk nitrogen dan fosfor. Nutrisi ini sangat penting untuk menumbuhkan produsen primer seperti ganggang dan lamun. Namun, asupan nutrisi yang berlebihan dari aktivitas manusia dapat menyebabkan penipisan oksigen yang dramatis dan pertumbuhan alga yang berbahaya, sehingga menyebabkan ketidakseimbangan ekologis. Muara bertindak sebagai penyaring alami, memerangkap dan memproses nutrisi berlebih, sehingga mengurangi dampak polusi nutrisi sebelum mencapai laut lepas. Selain itu, jaringan saluran, rawa-rawa, dan dataran lumpur yang kompleks di muara membantu menahan sedimen, mencegah erosi, dan menjaga kejernihan air. 4)

Sebagai kesimpulan, muara sungai merupakan ekosistem yang sangat berharga yang mendukung kehidupan berbagai macam hewan dan tumbuhan. Perannya sebagai tempat berkembang biak, pembibitan, dan koridor migrasi memastikan keberlangsungan dan konektivitas populasi akuatik. Selain itu, estuari berkontribusi terhadap kesehatan dan produktivitas ekosistem laut secara keseluruhan dengan menyaring kelebihan nutrisi dan menahan sedimen. Menyadari pentingnya ekologi muara sangat penting untuk konservasi dan pengelolaan yang berkelanjutan, karena muara menyediakan layanan ekologi yang penting dan berkontribusi terhadap kesejahteraan lingkungan baik bagi manusia maupun alam. 5)

#### 1.1. Estuari/Muara sebagai Ekosistem yang Penting secara Ekologis

Pentingnya estuari secara ekologis tidak dapat diragukan lagi. Estuari adalah ekosistem yang unik dan berharga yang memiliki banyak fungsi vital. Salah satu peran utamanya adalah sebagai penyangga alami, melindungi wilayah pesisir dari kekuatan gelombang dan badai yang merusak. Jaringan saluran, rawa-rawa, dan dataran lumpur yang rumit yang membentuk lingkungan muara membantu menyerap dan membuang energi gelombang yang masuk, mengurangi dampak pada wilayah pesisir yang berdekatan. Efek penyangga ini melindungi



pemukiman manusia, infrastruktur, dan ekosistem pesisir dari erosi dan banjir. 6)

Selain itu, muara memainkan peran penting dalam mendukung berbagai spesies yang bermigrasi dan menetap. Lingkungan yang dinamis ini menyediakan habitat penting bagi berbagai organisme, mulai dari fitoplankton mikroskopis dan vegetasi air yang terendam hingga invertebrata, ikan, dan avifauna. Muara berfungsi sebagai tempat pemijahan dan pembibitan berbagai spesies ikan, termasuk yang penting secara komersial seperti salmon dan udang. Kelimpahan makanan dan tempat berlindung di muara menarik burung-burung yang bermigrasi, seperti bangau, burung kuntul, dan burung pantai, yang mengandalkan habitat ini untuk beristirahat dan mencari makan selama perjalanan panjang mereka. 7)

Kompleksitas muara sungai mendorong keanekaragaman hayati dan ketahanan ekologi yang tinggi. Jaringan interaksi yang rumit antara berbagai spesies dalam ekosistem estuaria menciptakan keseimbangan yang penting untuk menjaga kesehatan dan stabilitas lingkungan. Sebagai contoh, fitoplankton membentuk dasar rantai makanan estuaria, menyediakan makanan bagi invertebrata yang menyaring makanan dan ikan-ikan kecil. Organisme ini dimangsa ikan yang lebih besar, burung, dan mamalia. Hubungan antara pemangsa dan mangsa membantu mengatur ukuran populasi dan menjaga ekosistem yang sehat. 8)

Muara juga menyediakan jasa ekosistem penting yang bermanfaat bagi manusia. Muara bertindak sebagai penyaring air alami, memerangkap sedimen dan polutan sebelum mencapai lautan lepas. Proses penyaringan ini membantu meningkatkan kualitas air, melindungi ekosistem hilir, dan menyediakan air bersih untuk digunakan manusia. Muara juga berfungsi sebagai penyerap karbon, menyerap dan menyimpan karbon dioksida dari atmosfer, sehingga mengurangi dampak perubahan iklim. 9)

Sebagai kesimpulan, muara sungai memiliki nilai ekologis yang sangat penting karena perannya sebagai penyangga alami, penyediaan habitat penting bagi berbagai spesies, dan kontribusinya terhadap

keanekaragaman hayati dan ketahanan ekologis. Lingkungan yang unik ini melindungi wilayah pesisir dari kekuatan gelombang dan badai yang merusak dan mendukung jaringan organisme yang saling bergantung. Dengan memahami dan melestarikan muara sungai, kita dapat memastikan stabilitas dan kesehatan ekosistem ini untuk generasi mendatang. 10)

Estuari, zona peralihan antara air tawar dan laut, merupakan ekosistem yang sangat beragam dan produktif yang mendukung berbagai spesies tanaman dan hewan. Namun, muara sungai menghadapi tekanan antropogenik yang semakin meningkat, terutama terkait kontaminasi logam berat. Lingkungan muara ini sangat rentan terhadap aktivitas manusia karena kedekatannya dengan kawasan industri, ladang pertanian, dan pusat-pusat perkotaan. 11)

Urbanisasi dan industrialisasi telah mengakibatkan pelepasan berbagai logam berat ke perairan muara. Pertambangan, manufaktur, dan pembangkit listrik berkontribusi terhadap pelepasan logam berat seperti timbal, kadmium, merkuri, dan kromium. Unsur-unsur beracun ini dapat masuk ke muara melalui limbah industri secara langsung atau secara tidak langsung melalui limpasan air hujan perkotaan. Selain itu, praktik pertanian, termasuk penggunaan pupuk dan pestisida, juga berkontribusi terhadap keberadaan logam berat di ekosistem muara. Pembuangan limbah yang tidak tepat, seperti membuang limbah dan sampah yang tidak diolah, semakin memperparah kondisi ini. 12)

Setelah masuk ke perairan estuaria, logam berat dapat terakumulasi dalam sedimen dan biota. Sedimen bertindak sebagai penyerap, menjebak dan menyimpan kontaminan ini dari waktu ke waktu. Akumulasi logam berat dalam sedimen dapat memiliki efek jangka panjang pada kesehatan dan fungsi ekosistem muara secara keseluruhan. Selain itu, organisme estuaria seperti ikan, kerang-kerangan, dan invertebrata benthik dapat mengakumulasi logam berat dalam jaringan mereka. Bioakumulasi ini terjadi ketika organisme ini menelan sedimen yang terkontaminasi atau memakan organisme lain yang telah mengakumulasi logam berat. Akibatnya, organisme estuaria menjadi

sangat terpapar oleh toksisitas logam berat, yang dapat mengganggu pertumbuhan, reproduksi, dan kebugaran mereka secara keseluruhan. 13)

Keberadaan logam berat di ekosistem estuaria menimbulkan risiko ekologis yang parah. Kontaminan ini dapat mengganggu keseimbangan rantai makanan, mempengaruhi kelimpahan dan distribusi spesies. Selain itu, logam berat dapat menyebabkan gangguan fisiologis dan biokimiawi pada organisme estuaria, yang mengarah pada efek subletal dan bahkan kematian. Implikasi ekologis dari kontaminasi logam berat di muara sungai tidak hanya berdampak langsung pada organisme. Pencemaran ini juga dapat berdampak pada fungsi ekosistem estuaria secara keseluruhan, termasuk siklus nutrisi, dinamika sedimen, dan produktivitas primer. 14)

Selain itu, memasukkan logam berat ke dalam ekosistem estuaria menimbulkan kekhawatiran tentang potensi transfer trofik dari kontaminan ini ke manusia. Ikan muara, khususnya, memainkan peran penting dalam makanan manusia dan dapat bertindak sebagai vektor paparan logam berat. Bioakumulasi logam berat dalam jaringan ikan dapat mengakibatkan risiko kesehatan manusia ketika ikan yang terkontaminasi ini dikonsumsi. Paparan kronis terhadap logam berat melalui konsumsi ikan dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan saraf, kerusakan ginjal, dan kanker. 15)

Mengingat implikasi ekologi dan kesehatan manusia yang kritis, mengembangkan strategi *biomonitoring* yang efektif untuk menilai tingkat logam berat di muara sangat penting. *Biomonitoring* melibatkan pemantauan kadar logam berat dalam berbagai komponen ekosistem estuaria, termasuk sedimen, air, dan biota. Dengan memantau parameter-parameter ini secara teratur, para ilmuwan dapat memperoleh informasi yang berharga mengenai tingkat kontaminasi logam berat dan potensi dampaknya. *Biomonitoring* juga membantu mengidentifikasi titik-titik pencemaran logam berat, memandu tindakan manajemen, dan mengevaluasi efektivitas upaya remediasi. 16)

Kesimpulannya, muara sungai menghadapi tantangan yang signifikan karena tekanan antropogenik, terutama kontaminasi logam berat. Urbanisasi, industrialisasi, limpasan pertanian, dan pembuangan limbah yang tidak tepat telah menyebabkan masuknya logam berat ke dalam perairan muara. Kontaminan ini dapat terakumulasi dalam sedimen dan biota, sehingga menimbulkan risiko ekologis yang parah. Selain itu, transfer trofik logam berat dari organisme estuaria ke manusia melalui konsumsi ikan menimbulkan kekhawatiran tentang kesehatan manusia. Oleh karena itu, mengembangkan strategi *biomonitoring* yang efektif untuk menilai tingkat logam berat dan mengurangi dampak terhadap lingkungan dan kesehatan manusia di muara sangatlah penting. 17)



### 1.2. Logam Berat di Muara: Sumber, Keberadaan, dan Dampaknya

Keberadaan logam berat di muara merupakan masalah kompleks yang berasal dari kombinasi faktor alami dan faktor yang disebabkan oleh manusia. Meskipun sumber-sumber alami seperti pelapukan geologi, aktivitas gunung berapi, dan pengendapan di atmosfer berkontribusi terhadap keberadaan logam berat di muara sungai, dampaknya relatif kecil dibandingkan dengan dampak antropogenik. Aktivitas manusia memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap siklus geokimia alami dari

logam berat, yang mengakibatkan pelepasan jumlah yang signifikan ke dalam lingkungan muara. 18)

Salah satu kontributor utama pencemaran logam berat di muara adalah limbah industri. Industri yang terlibat dalam manufaktur, pertambangan, dan pengolahan sering kali melepaskan limbah yang mengandung logam berat dengan konsentrasi tinggi ke badan air di dekatnya, termasuk muara. Logam-logam ini dapat berasal dari berbagai proses industri, seperti pelapisan logam, produksi bahan kimia, dan operasi pertambangan. Pembuangan air limbah industri yang tidak diolah atau diolah dengan buruk dapat menyebabkan akumulasi logam berat di sedimen dan air muara, sehingga menimbulkan ancaman yang signifikan terhadap ekosistem. 19)

Limbah buangan juga berperan dalam kontaminasi logam berat di muara. Air limbah rumah tangga mengandung logam berat dari berbagai sumber, termasuk produk pembersih rumah tangga, barang-barang perawatan pribadi<sup>37</sup> dan sistem pipa. Meskipun instalasi pengolahan limbah modern bertujuan untuk menghilangkan atau mengurangi kandungan logam berat dalam limbah, fasilitas yang lebih tua atau tidak terawat dengan baik dapat melepaskan limbah yang tidak diolah ke lingkungan muara, yang berkontribusi terhadap beban polusi secara keseluruhan. Selain itu, luapan saluran pembuangan gabungan selama hujan lebat dapat menyebabkan konsentrasi logam berat yang tinggi masuk ke muara, yang semakin memperburuk masalah. 20)

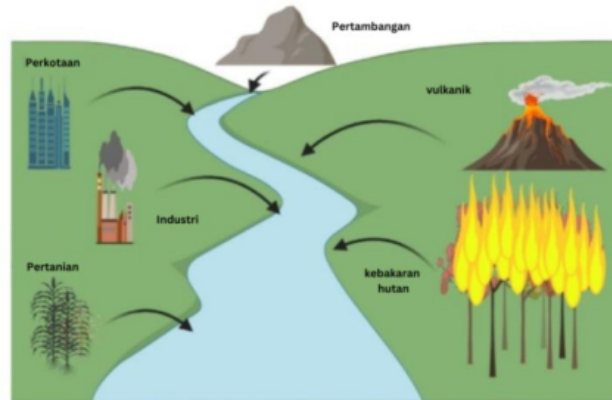
Limpasan pertanian merupakan sumber logam berat lain yang signifikan di muara. Penggunaan pupuk, pestisida, dan limbah ternak dalam praktik pertanian dapat mengakibatkan akumulasi logam berat dalam tanah. Ketika tanah-tanah ini terkikis atau tersapu oleh air hujan, logam berat terbawa ke badan air di dekatnya, termasuk muara. Selain itu, praktik irigasi dapat menyebabkan pencucian logam berat dari lahan pertanian ke dalam air tanah, yang pada akhirnya dapat masuk ke muara melalui air permukaan atau air tanah. 21)

Limpasan air hujan di perkotaan merupakan kontributor lain terhadap polusi logam berat di muara. Seiring dengan meluasnya wilayah

perkotaan, permukaan kedan<sup>61</sup> air seperti jalan, tempat parkir, dan atap bangunan semakin banyak, sehingga air hujan tidak dapat meresap ke dalam tanah. Sebaliknya, air hujan, yang dikenal sebagai limpasan air hujan, mengalir di atas permukaan-permukaan ini, membawa polutan seperti logam berat. Limpasan yang terkontaminasi ini kemudian dibuang secara langsung atau tidak langsung ke muara melalui saluran air hujan atau sungai, sehingga menambah beban logam berat. 22)

Setelah masuk ke lingkungan muara, logam berat dapat mengalami berbagai proses fisika-kimia yang memengaruhi nasib dan perilakunya. Adsorpsi pada sedimen adalah proses yang umum terjadi di mana logam berat berikatan dengan partikel sedimen, sehingga mengurangi mobilitas dan ketersediaan hayati. Kompleksasi dengan bahan organik, seperti karbon organik terlarut, juga dapat terjadi, yang mempengaruhi transportasi dan nasib logam berat di muara. Selain itu, biota, termasuk tanaman dan hewan, dapat menyerap logam berat, yang mengarah ke bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan di muara. 23)

Kesimpulannya, keberadaan logam berat di muara adalah masalah yang kompleks yang dipengaruhi oleh sumber-sumber alami dan antropogenik. Meskipun sumber-sumber alamiah memang berkontribusi terhadap polusi logam berat, namun aktivitas manusia yang memiliki dampak paling signifikan. Buangan industri, limbah cair, limpasan pertanian, dan limpasan air hujan di perkotaan semuanya secara signifikan memasukkan logam berat ke dalam lingkungan muara. Memahami sumber-sumber ini dan proses fisikokimia di dalam muara sangat penting untuk pengelolaan yang efektif dan strategi mitigasi untuk melindungi ekosistem yang berharga ini. 24)



Gambar 2. Sumber-sumber logam berat (Naija & Yalcin, 2023)



Gambar 3. Model konseptual dari variabel dan proses fisika, kimia, dan biologi untuk perilaku dan toksisitas logam. Perairan estuaria dicirikan oleh gradien fisikokimia yang kuat, misalnya salinitas, densitas, kecepatan aliran, dan komposisi bahan tersuspensi, yang berpengaruh penting pada nasib logam. Masukan air tawar (kepadatan rendah) dan air asin (kepadatan tinggi) biasanya menghasilkan sirkulasi muara, dengan gradien salinitas vertikal dan pembilasan air tawar terutama di permukaan. Kekeruhan di *estuary* dihasilkan dari debit sungai dan gradien salinitas. Kontaminasi logam di muara bawah tanah terjadi karena perbedaan gradien sehingga mempengaruhi mobilisasi logam. Pada sistem muara bawah tanah yang tidak terkurung, intrusi air asin berasal dari laut, sementara air tawar mengalir dari sisi kontinental.

(Abel de Souza Machado *et al.*, 2016).

### 1.3. Penggunaan Ikan sebagai Bioindikator Pemantauan Logam Berat

Banyak faktor lingkungan, seperti hidrodinamika, gradien salinitas, karakteristik sedimen, dan variasi musiman, yang memengaruhi nasib dan transportasi logam berat di muara. Interaksi yang rumit ini menentukan pola distribusi spasial dan temporal logam berat, sehingga menimbulkan tantangan unik untuk pemantauan dan penilaian yang efektif. Selain itu, dampak logam berat terhadap ekosistem estuaria memiliki banyak aspek. Unsur-unsur beracun ini dapat memberikan efek toksik akut dan kronis pada organisme akuatik, yang memengaruhi fisiologi, perilaku, dan keberhasilan reproduksi mereka. Selain itu, akumulasi logam berat pada biota dapat menyebabkan biomagnifikasi pada rantai makanan, yang berpotensi mengekspos organisme tingkat trofik yang lebih tinggi, termasuk manusia, terhadap kontaminan yang tinggi. 25)

Mengingat posisi mereka yang tidak terpisahkan dalam jaring makanan akuatik dan kemampuan mereka untuk mengakumulasi logam berat dari lingkungan, ikan muncul sebagai bioindikator yang sangat berharga untuk memantau kontaminasi logam berat di muara. Sebagai penanda kesehatan ekosistem, ikan mencerminkan kualitas lingkungan secara keseluruhan dari sistem estuaria, yang merangkul efek kumulatif dari kegiatan antropogenik. Kesesuaian ikan sebagai bioindikator disebabkan oleh umurnya yang panjang, sifatnya yang relatif menetap, dan posisinya dalam hierarki trofik, yang memungkinkannya untuk mengintegrasikan paparan logam berat dari waktu ke waktu dan dari ruang ke ruang. 26)

Menggunakan ikan sebagai bioindikator memfasilitasi deteksi kontaminasi logam berat pada pola spasial dan temporal, memberikan wawasan tentang sumber polusi dan mengidentifikasi area yang menjadi perhatian khusus. Selain itu, spesies ikan tertentu menunjukkan kepekaan khusus terhadap logam berat tertentu, memberikan pemahaman yang lebih baik tentang risiko ekologis yang ditimbulkan oleh kontaminan individu. Selain itu, karena populasi manusia sering mengonsumsi sumber daya perikanan, pemantauan tingkat logam berat pada spesies ikan



memiliki tujuan ganda untuk menilai kesehatan ekologi dan risiko kesehatan manusia yang terkait dengan konsumsi makanan laut yang terkontaminasi. 27)

Banyak faktor lingkungan, seperti hidrodinamika, gradien salinitas, karakteristik sedimen, dan variasi musiman, yang memengaruhi nasib dan pengangkutan logam berat di muara. Estuari adalah ekosistem yang dinamis di mana pencampuran air tawar dan air laut menciptakan interaksi kompleks yang menentukan pola distribusi spasial dan temporal logam berat. Hidrodinamika, termasuk arus pasang surut, gelombang, dan aliran sungai, sangat penting dalam mengangkut dan menyebarkan logam berat di dalam muara. Tergantung pada kondisi yang ada, pergerakan ini dapat menyebabkan akumulasi atau penyebaran kontaminan. Gradien salinitas, yang bervariasi dari air tawar ke air asin, juga mempengaruhi nasib logam berat. Ketika salinitas air berubah, hal itu dapat memengaruhi kelarutan dan reaktivitas logam berat, yang pada akhirnya berdampak pada pergerakan dan perilakunya dalam sistem estuaria. 28)

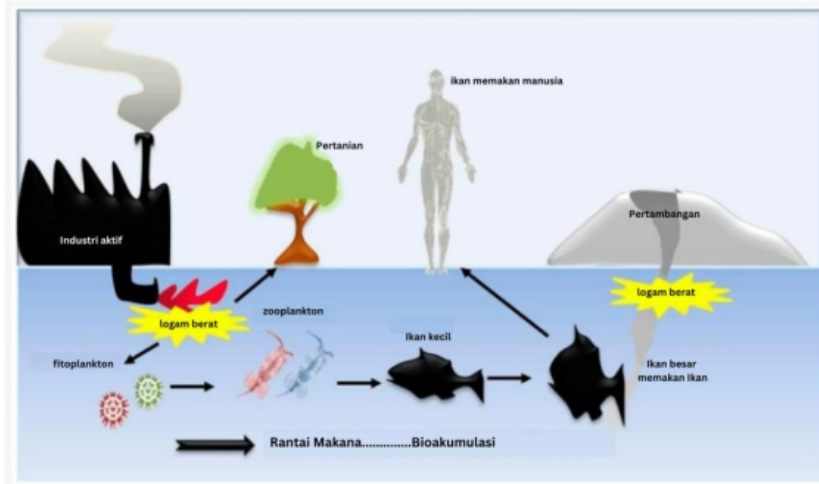
Karakteristik sedimen, termasuk ukuran butiran, kandungan bahan organik, dan komposisi mineral, memainkan peran penting dalam nasib dan transportasi logam berat. Logam berat memiliki afinitas yang kuat untuk mengikat sedimen, terutama yang kaya akan bahan organik dan partikel-partikel halus. Ikatan ini dapat menyebabkan pengendapan dan akumulasi logam berat di sedimen estuaria, di mana logam berat tersebut dapat bertahan dalam jangka waktu yang lama. Variasi musiman, seperti perubahan suhu, curah hujan, dan debit sungai, selanjutnya dapat mempengaruhi nasib dan pengangkutan logam berat di muara. Misalnya, peningkatan limpasan selama musim hujan dapat memengaruhi konsentrasi logam berat di perairan muara dan sedimen, yang dapat membawa kontaminan dari sumber-sumber hulu. 29)

Interaksi yang rumit di antara faktor-faktor lingkungan ini menimbulkan tantangan unik untuk memantau dan menilai logam berat secara efektif di muara. Teknik pemantauan tradisional sering kali melibatkan pengumpulan sampel air dan sedimen di lokasi dan titik waktu

tertentu, yang mungkin tidak dapat menangkap variabilitas spasial dan temporal distribusi logam berat. Oleh karena itu, penggunaan teknologi canggih, seperti pengindraan jarak jauh, sensor in situ, dan pendekatan pemodelan, sangat penting untuk pemahaman yang lebih komprehensif tentang dinamika logam berat dalam sistem estuaria. Alat-alat ini dapat memberikan data waktu nyata tentang konsentrasi logam berat, yang memungkinkan penilaian dan strategi pengelolaan yang lebih baik untuk melindungi ekosistem estuaria. 30)

Selain itu, dampak logam berat terhadap ekosistem estuaria memiliki banyak aspek. Unsur-unsur beracun ini dapat menimbulkan efek toksik akut dan kronis pada organisme akuatik, yang memengaruhi fisiologi, perilaku, dan keberhasilan reproduksi mereka. Logam berat dapat mengganggu sistem enzim, merusak fungsi seluler, dan menyebabkan stres oksidatif, yang mengarah pada efek kesehatan yang merugikan pada organisme muara. Selain itu, akumulasi logam berat pada biota dapat menyebabkan biomagnifikasi pada rantai makanan. Logam berat dapat menjadi lebih terkonsentrasi pada organisme tingkat trofik yang lebih tinggi karena organisme yang lebih besar mengkonsumsi beberapa organisme yang lebih kecil. Proses biomagnifikasi ini pada akhirnya dapat menyebabkan peningkatan kadar kontaminan pada predator teratas, termasuk manusia yang mengonsumsi makanan laut dari lingkungan muara. 31)

Kesimpulannya, nasib dan transportasi logam berat di muara dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk hidrodinamika, gradien salinitas, karakteristik sedimen, dan variasi musim. Interaksi yang kompleks ini menentukan pola distribusi spasial dan temporal logam berat, yang menghadirkan tantangan untuk pemantauan dan penilaian yang efektif. Dampak logam berat terhadap ekosistem estuaria sangat signifikan, dengan potensi efek toksik akut dan kronis pada organisme akuatik dan risiko biomagnifikasi pada rantai makanan. Memahami dan mengelola dinamika logam berat di muara sangat penting untuk melestarikan dan melindungi ekosistem yang berharga tetapi rapuh ini. 32)



Gambar 4. *Biomonitoring* pencemaran logam berat menggunakan ikan sebagai bioindikator. Bioakumulasi logam berat akibat aktivitas pertambangan dan industri, serta pengaruhnya terhadap rantai makanan di perairan (Mehana *et al.*, 2020)

## BAB 2

### Landasan Ekotoksikologi

---

#### 2.1. Prinsip-prinsip Ekotoksikologi dalam Sistem Estuaria

Ekotoksikologi, ilmu yang mempelajari dampak polutan terhadap ekosistem, berperan penting dalam memahami dampak polutan terhadap lingkungan muara. Estuari adalah sistem dinamis tempat air tawar dan air asin bergabung, menciptakan ekosistem yang unik dan rentan. Interaksi berbagai pemicu stres, seperti kontaminasi logam berat, di lingkungan ini menghadirkan tantangan yang kompleks untuk penilaian risiko ekologis. 33)

Prinsip-prinsip ekotoksikologi memberikan kerangka kerja yang ketat untuk mengevaluasi dampak polutan terhadap organisme dan ekosistem. Hal ini memungkinkan para peneliti untuk menilai toksisitas polutan, bioakumulasi, dan biomagnifikasi di lingkungan muara. Dengan mempelajari nasib dan pengangkutan polutan, ahli ekotoksikologi dapat menentukan dampaknya terhadap organisme individu, populasi, dan seluruh ekosistem.

Banyak faktor fisikokimia, interaksi biotik, dan pemicu stres antropogenik yang menjadi ciri sistem estuaria. Faktor-faktor fisikokimia meliputi variasi salinitas, suhu, kadar oksigen terlarut, dan komposisi sedimen. Faktor-faktor ini memengaruhi distribusi, perilaku, dan kerentanan organisme terhadap polutan. Interaksi biotik, seperti pemangsaan, kompetisi, dan simbiosis, membentuk respons organisme terhadap polutan.

Stresor antropogenik, seperti buangan industri, limbah pertanian, dan urbanisasi, berkontribusi secara signifikan terhadap kontaminasi lingkungan muara. Karena aktivitas manusia, logam berat, termasuk merkuri, kadmium, dan timbal, merupakan salah satu polutan yang paling umum ditemukan di muara sungai. Zat-zat beracun ini dapat terakumulasi dalam tubuh organisme, sehingga berdampak buruk pada fisiologi, reproduksi, dan kelangsungan hidup mereka. Ekotoksikologi membantu

kita memahami bagaimana polutan ini berdampak pada ekosistem muara dan menginformasikan strategi pengelolaan dan remediasinya.

Untuk memahami sepenuhnya risiko ekologis yang terkait dengan polutan dalam sistem estuaria, para ahli ekologi dan peneliti harus mempertimbangkan kompleksitas dan keterkaitan berbagai faktor yang berperan. Hal ini termasuk mempelajari interaksi antara berbagai pemicu stres, memahami sensitivitas organisme yang berbeda terhadap polutan, dan memeriksa efek jangka panjang pada struktur dan fungsi ekosistem.

Kesimpulannya, ekotoksikologi membentuk landasan untuk memahami dampak polutan pada ekosistem estuaria. Dengan menyediakan kerangka kerja yang kuat untuk mengevaluasi dampak polutan, kita dapat menilai risiko yang terkait dengan kontaminasi logam berat dan pemicu stres lainnya di lingkungan yang dinamis ini. Mengenali kompleksitas sistem estuaria sangat penting untuk penilaian risiko ekologi praktis dan pengembangan praktik manajemen yang berkelanjutan untuk melindungi ekosistem vital ini.

Sifat dinamis dari muara menjadikannya ekosistem yang kompleks dan menantang untuk dipelajari dalam hal ekotoksikologi. Estuari, zona transisi di mana air tawar dari sungai bertemu dan bercampur dengan air asin dari lautan, mengalami variabilitas yang signifikan dalam hal salinitas, suhu, dan tingkat nutrisi. Fluktuasi ini dapat secara signifikan mempengaruhi ketersediaan hayati dan toksisitas logam berat bagi organisme air yang tinggal di habitat ini. Oleh karena itu, pendekatan holistik yang mempertimbangkan berbagai faktor yang berdampak pada muara sungai diperlukan untuk melakukan studi ekotoksikologi yang komprehensif.

Untuk menilai secara akurat potensi risiko yang ditimbulkan oleh kontaminasi logam berat di muara sungai, sangat penting untuk menggabungkan eksperimen laboratorium dan studi lapangan. Eksperimen laboratorium menyediakan kondisi terkontrol yang memungkinkan peneliti untuk mengisolasi dan memanipulasi variabel, memfasilitasi pemahaman yang lebih baik tentang hubungan sebab-akibat. Studi-studi ini dapat membantu menentukan bioakumulasi logam berat dan efek sampingnya terhadap organisme tertentu dalam kondisi yang terkendali.

Namun, hanya mengandalkan eksperimen laboratorium mungkin tidak dapat menangkap berbagai respons ekologis di lingkungan muara yang kompleks dan dinamis. Studi lapangan, di sisi lain, memberikan representasi yang lebih realistis tentang interaksi antara organisme dan lingkungannya. Dengan melakukan penelitian secara langsung di habitat estuaria, para ilmuwan dapat menjelaskan variabilitas alami pada faktor-faktor seperti salinitas, suhu, dan tingkat nutrisi, yang dapat memengaruhi perilaku dan respons organisme terhadap kontaminasi logam berat.

70

Selain itu, spesies estuaria memiliki adaptasi fisiologis yang unik yang memungkinkan mereka untuk berkembang dalam kondisi lingkungan yang berfluktuasi. Adaptasi ini dapat secara signifikan mempengaruhi sensitivitas dan respons mereka terhadap logam berat. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan sifat-sifat fisiologis spesifik organisme estuaria ketika menilai risiko kontaminasi logam berat. Dengan memahami respons spesifik spesies, para peneliti dapat memprediksi konsekuensi ekologis dan dampak potensial pada komunitas estuaria dengan lebih baik.

Sifat interdisipliner dari studi ekotoksikologi estuaria sangat penting untuk memahami kontaminasi logam berat di habitat penting ini secara komprehensif. Menggabungkan pengetahuan dari berbagai disiplin ilmu, seperti biologi, kimia, dan ilmu lingkungan, memungkinkan para peneliti untuk mengintegrasikan perspektif dan metodologi yang berbeda. Pendekatan interdisipliner ini memungkinkan penilaian yang lebih akurat terhadap konsekuensi ekologis dari kontaminasi logam berat di muara sungai dan memfasilitasi pengembangan strategi mitigasi yang ditargetkan.

Kesimpulannya, sifat dinamis dari muara sungai menuntut pendekatan holistik untuk studi ekotoksikologi. Dengan mempertimbangkan variabilitas salinitas, suhu, dan tingkat nutrisi serta menggabungkan eksperimen laboratorium dan studi lapangan, para peneliti dapat menangkap berbagai respons ekologis terhadap kontaminasi logam berat. Selain itu, memperhitungkan adaptasi fisiologis yang unik dari spesies estuaria sangat penting untuk penilaian risiko yang akurat. Melalui penelitian interdisipliner, kita dapat memprediksi

konsekuensi ekologis dari kontaminasi logam berat di muara sungai dan merancang strategi mitigasi yang ditargetkan untuk melindungi habitat penting ini.

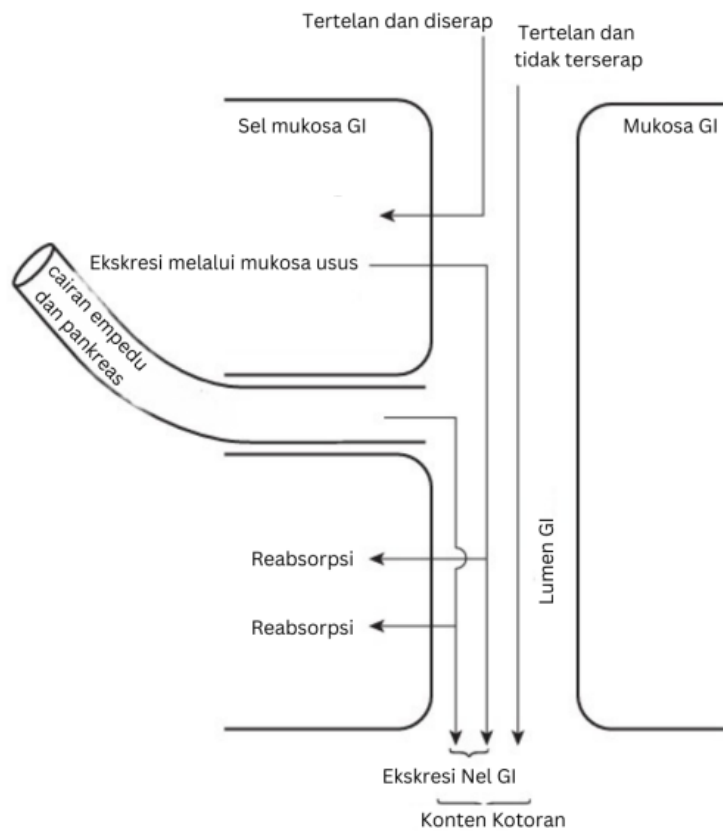
## 2.2. Toksisitas Logam Berat terhadap Organisme Akuatik

Logam berat mengancam keseimbangan ekosistem estuaria yang rentan, memberikan efek toksik pada banyak organisme air. Mekanisme toksisitas logam berat dapat bervariasi di antara spesies yang berbeda, dengan beberapa spesies menunjukkan toleransi yang lebih tinggi sementara yang lain menyerah pada konsentrasi kontaminan yang rendah sekalipun. Variasi ini dapat dikaitkan dengan sifat fisiologis spesifik spesies, seperti protein pengikat logam, mekanisme detoksifikasi, dan transporter membran, yang menentukan serapan, akumulasi, dan eliminasi logam berat.

Selain itu, efek toksik dari logam berat tidak terbatas pada kematian langsung; efek subletal dapat memiliki konsekuensi yang luas pada kebugaran individu dan dinamika populasi. Menanggapi paparan logam berat, gangguan reproduksi, pertumbuhan, dan perilaku dapat mengganggu interaksi ekologis dan dinamika trofik dalam jaring-jaring makanan di muara sungai. Selain itu, paparan jangka panjang terhadap logam berat dapat mengganggu keanekaragaman genetik dan ketahanan populasi estuaria, membuat mereka rentan terhadap tekanan dan gangguan lingkungan lainnya.

Mengingat kompleksitas ini, sangat penting untuk melakukan studi toksisitas menyeluruh pada spesies estuaria utama untuk membangun hubungan dosis-respons dan mengidentifikasi indikator sensitif dari stres logam berat. Penelitian semacam itu sangat penting dalam mengembangkan kriteria kualitas air yang relevan secara ekologis dan model penilaian risiko ekologis, sehingga memfasilitasi perlindungan dan konservasi ekosistem estuaria.

Logam dalam lumen gastrointestinal dapat berasal dari makanan dan minuman atau dapat ditransfer ke saluran pencernaan setelah pengendapan awal di saluran pernapasan dan diangkut melalui pembersihan mukosiliar ke faring (Gambar 5).



Gambar 5. Rute penyerapan logam yang tertelan. Logam yang tertelan kemudian diserap melalui saluran pencernaan (GI/gastrointestinal) atau tidak terserap. Logam dapat diekskresikan melalui mukosa usus dan sebagian dapat diserap kembali; bagian yang tersisa masuk ke dalam tinja. Ekskresi logam dapat terjadi melalui empedu dan cairan pankreas dan kemudian diserap kembali atau diekskresikan ke dalam tinja. Ketika diserap kembali, masuk ke dalam sirkulasi enterohepatik. Ekskresi saluran pencernaan bersih adalah bagian dari saluran pencernaan yang tidak diserap kembali, tetapi diekskresikan melalui tinja. Kandungan tinja adalah jumlah dari logam yang telah diekskresikan oleh saluran pencernaan dan logam yang tidak terserap (Elder *et al.*, 2022).



Tabel 1. Pengaruh berbagai logam berat pada ikan

No	Logam berat	Sumber	Efek pada ikan	Referensi
1	Cu (tembaga)	Fungisida, algasida, moluskasida, insektisida	Hati, ginjal, insang, jaringan hematopoesis, mekanoreseptor, kemoresptor	Rani <i>et al.</i> , 2022
2	Ni (nikel)	Industri, pembangkit listrik berbahan bakar minyak, pembangkit listrik tenaga batu bara, insinerator sampah	Penurunan denyut jantung, gangguan memori/otak	Rani <i>et al.</i> , 2022
3	Hg (merkuri)	Pestisida, baterai, industri kertas	Otot dan ovarium	Rani <i>et al.</i> , 2022
4	Pb (timbal)	Limbah pertanian, lumpur limbah, abu terbang dari pembangkit listrik tenaga batu bara, pabrik baterai, bijih logam	Tulang, otot, darah, toksisitas kronis, stress oksidatif, neurotoksisitas	Rani <i>et al.</i> , 2022
5	As (arsen)	Perusahaan manufaktur, tambang mineral, operasi peleburan, stasiun pembangkit listrik	Sesak nafas, epitelium insang, ginjal, nekrosis dan fibrosa pada tubuh	Rani <i>et al.</i> , 2022



Gambar 6. Efek logam berat dan pestisida pada ikan (Rani *et al.*, 2022)

### 2.3. Proses Bioakumulasi dan Biomagnifikasi

Bioakumulasi dan biomagnifikasi sangat penting dalam persistensi dan pembesaran kontaminan logam berat di dalam rantai makanan di muara sungai. Bioakumulasi mengacu pada akumulasi bertahap logam berat dalam jaringan organisme dari waktu ke waktu, yang terjadi karena paparan terus menerus melalui air, sedimen, atau makanan. Sebagai ekosistem yang dinamis di mana air tawar bertemu dengan laut, muara sungai sangat rentan terhadap kontaminasi logam berat. Berbagai faktor di muara, seperti fluktuasi salinitas, tingkat pH, dan kandungan bahan organik, dapat mempengaruhi ketersediaan hayati logam berat. Faktor-faktor ini, pada gilirannya, mempengaruhi tingkat bioakumulasi pada biota. Sebagai contoh, perubahan salinitas dapat mengubah kelarutan dan mobilitas logam berat, yang pada akhirnya berdampak pada ketersediaannya untuk diserap oleh organisme.

Selain itu, pH perairan estuaria dapat mempengaruhi spesiasi logam berat, menentukan toksisitas dan potensi bioakumulasi. Selain itu, bahan organik dapat mengikat logam berat, mengurangi atau meningkatkan ketersediaan hayati bagi organisme yang berbeda. Ketika logam berat terakumulasi dalam jaringan organisme, logam berat dapat berdampak buruk pada kesehatan dan kebugaran mereka secara keseluruhan. Selain itu, kontaminan ini dapat ditransfer dan diperbesar melalui tingkat trofik dalam proses yang dikenal sebagai biomagnifikasi. Biomagnifikasi berarti organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi, seperti predator, dapat memiliki konsentrasi logam berat yang lebih tinggi daripada mangsanya. Akibatnya, predator teratas dalam rantai makanan estuaria dapat mengalami tingkat kontaminasi logam berat tertinggi. Kesimpulannya, proses bioakumulasi dan biomagnifikasi merupakan kontributor yang signifikan terhadap persistensi dan pembesaran kontaminan logam berat dalam rantai makanan estuaria. Memahami proses-proses ini dan berbagai faktor yang mempengaruhinya sangat penting untuk menilai dan mengelola dampak pencemaran logam berat pada ekosistem estuaria dan organisme di dalamnya.

Biomagnifikasi adalah fenomena mengkhawatirkan yang terjadi ketika logam berat semakin terakumulasi dan meningkat konsentrasinya ketika mereka bergerak naik ke tingkat trofik dalam rantai makanan.

13  
Dalam ekosistem muara, spesies pada tingkat trofik yang lebih tinggi, seperti ikan predator dan burung, sangat rentan terhadap proses ini. Organisme-organisme ini mengakumulasi logam berat dalam jumlah yang tinggi karena makanan mereka, yang terdiri dari organisme mangsa yang sudah terkontaminasi polutan ini. Akibatnya, spesies predator di bagian atas rantai makanan dapat mengalami peningkatan konsentrasi logam berat yang signifikan, sehingga menimbulkan kekhawatiran akan potensi risiko bagi satwa liar dan manusia yang mengonsumsi makanan laut dari ekosistem ini.

Proses biomagnifikasi didorong oleh fakta bahwa logam berat, seperti merkuri, timbal, dan kadmium, tidak dapat dimetabolisme atau diekskresikan dengan cepat oleh organisme. Ketika organisme yang lebih rendah dalam rantai makanan mengonsumsi air atau sedimen yang terkontaminasi polutan ini, mereka menyerap beberapa logam berat. Ketika pemangsa mengonsumsi organisme yang terkontaminasi ini, logam berat dipindahkan ke tubuh pemangsa. Seiring waktu, pemangsa mengakumulasi lebih banyak logam berat, menghasilkan konsentrasi yang lebih tinggi dalam jaringan mereka.

Implikasi biomagnifikasi sangat mengkhawatirkan bagi spesies predator dan manusia yang mengandalkan makanan laut sebagai sumber nutrisi. Ikan predator, misalnya, dapat mengakumulasi logam berat yang signifikan dalam jaringan mereka, termasuk otot yang biasa dikonsumsi manusia. Biomagnifikasi menimbulkan kekhawatiran tentang potensi risiko kesehatan yang terkait dengan konsumsi makanan laut yang terkontaminasi. Logam berat dapat merusak berbagai sistem fisiologis, termasuk sistem saraf, reproduksi, dan kekebalan tubuh. Paparan logam berat dalam waktu lama dapat menyebabkan masalah kesehatan yang serius, seperti gangguan saraf, masalah perkembangan, dan gangguan fungsi kekebalan tubuh.

Lebih jauh lagi, efek biomagnifikasi melampaui organisme individu. Ketika logam berat terakumulasi dalam jaringan predator utama, mereka juga dapat berdampak pada kesehatan ekosistem secara keseluruhan. Spesies predator memainkan peran penting dalam menyeimbangkan dinamika populasi mangsanya dan menjaga struktur dan fungsi jaring makanan secara keseluruhan. Jika predator ini terpengaruh secara negatif

oleh akumulasi logam berat, hal ini dapat menyebabkan gangguan pada ekosistem, termasuk perubahan komposisi spesies, berkurangnya keanekaragaman hayati, dan siklus nutrisi yang berubah.

Mengatasi masalah biomagnifikasi membutuhkan pendekatan dari berbagai segi. Upaya-upaya yang dilakukan harus berfokus pada pengurangan pelepasan logam berat ke lingkungan melalui peraturan dan langkah-langkah pengendalian polusi. Selain itu, program pemantauan dapat membantu mengidentifikasi area yang menjadi perhatian dan melacak perubahan konsentrasi logam berat dari waktu ke waktu. Informasi ini dapat mendukung strategi pengelolaan dan membantu mengembangkan praktik penangkapan ikan yang berkelanjutan untuk meminimalkan risiko paparan bagi manusia dan satwa liar.

Kesimpulannya, biomagnifikasi adalah masalah lingkungan yang signifikan karena logam berat terakumulasi dan meningkat konsentrasinya ketika mereka bergerak naik ke tingkat trofik dalam rantai makanan. Spesies estuaria pada tingkat trofik yang lebih tinggi, seperti ikan predator dan burung, sangat rentan terhadap efek biomagnifikasi karena makanan mereka yang terdiri dari organisme mangsa yang telah terkontaminasi polutan ini. Meningkatnya konsentrasi logam berat di bagian atas rantai makanan menimbulkan kekhawatiran tentang potensi risiko bagi satwa liar dan manusia yang mengonsumsi makanan laut dari ekosistem ini. Sangat penting untuk mengatasi masalah ini melalui langkah-langkah pengendalian polusi, program pemantauan, dan praktik manajemen berkelanjutan untuk mengurangi dampak buruk biomagnifikasi pada ekosistem dan kesehatan manusia.

Mempelajari proses bioakumulasi dan biomagnifikasi sangat penting dalam menilai risiko ekologis jangka panjang dari kontaminasi logam berat di muara sungai. Sebagai zona transisi di mana air tawar bertemu dengan laut, muara adalah ekosistem yang sangat produktif yang mendukung komunitas tanaman, hewan, dan mikroorganisme yang beragam dan rentan. Namun, estuari juga sangat rentan terhadap polusi, termasuk kontaminan logam berat dari berbagai sumber antropogenik seperti buangan industri, limpasan pertanian, dan urbanisasi.

Bioakumulasi mengacu pada penumpukan zat-zat, seperti logam berat, di dalam jaringan tubuh organisme dari waktu ke waktu. Proses ini

terjadi ketika suatu organisme mengambil zat-zat ini dengan kecepatan yang lebih besar daripada kemampuannya untuk menghilangkan zat-zat tersebut. Di muara sungai, bioakumulasi dapat terjadi pada tanaman dan hewan, yang menyebabkan perpindahan logam berat melalui rantai makanan. Di sisi lain, biomagnifikasi mengacu pada peningkatan konsentrasi suatu zat ketika bergerak ke atas rantai makanan. Di muara sungai, predator teratas, seperti ikan atau burung, dapat mengakumulasi logam berat dalam jumlah yang lebih tinggi daripada mangsanya.

Memahami proses bioakumulasi dan biomagnifikasi di muara sangat penting untuk beberapa alasan. Pertama, mengidentifikasi spesies bioindikator utama, yaitu organisme yang sangat sensitif terhadap kontaminasi logam berat, dapat memberikan tanda peringatan dini terhadap gangguan ekosistem. Dengan memantau tingkat logam berat pada spesies ini, para ilmuwan dapat menilai tingkat kontaminasi dan potensi dampaknya terhadap kesehatan komunitas muara.

Kedua, dengan memahami faktor-faktor yang memengaruhi bioakumulasi dan biomagnifikasi, kita dapat memprediksi potensi dampak ekologis dari kontaminasi logam berat. Faktor-faktor seperti konsentrasi dan bentuk kimiawi dari logam berat serta karakteristik organisme dan habitatnya dapat secara signifikan mempengaruhi penyerapan dan transfer kontaminan ini dalam jaring makanan estuaria. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini, para ilmuwan dapat mengevaluasi risiko yang ditimbulkan terhadap berbagai spesies dan proses ekosistem dengan lebih baik.

Selain itu, studi tentang proses bioakumulasi dan biomagnifikasi dapat memandu pengembangan strategi manajemen yang efektif untuk mengurangi input logam berat ke lingkungan estuaria dan mengurangi risiko biomagnifikasi. Studi ini dapat mencakup penerapan peraturan yang lebih ketat tentang pembuangan limbah industri, mempromosikan praktik pertanian berkelanjutan, dan meningkatkan sistem pengolahan air limbah. Dengan mengatasi sumber kontaminasi dan meminimalkan paparan organisme muara terhadap logam berat, kita dapat melindungi integritas dan keberlanjutan ekologi ekosistem yang kritis ini.

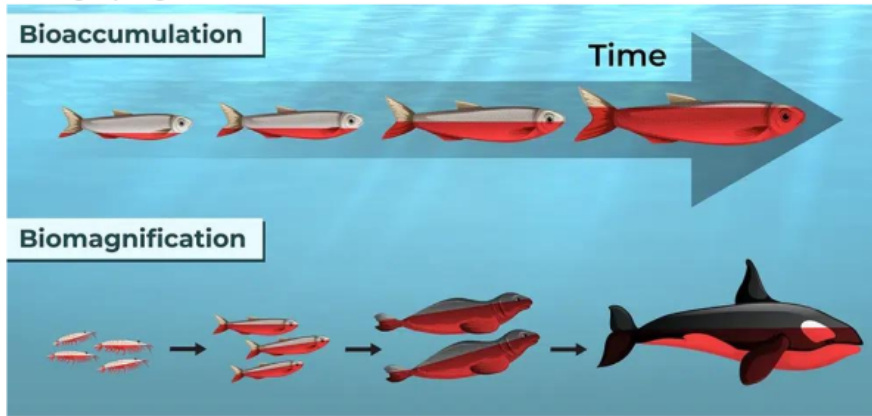
Sebagai kesimpulan, mempelajari proses bioakumulasi dan biomagnifikasi di muara sangat penting dalam menilai risiko ekologis

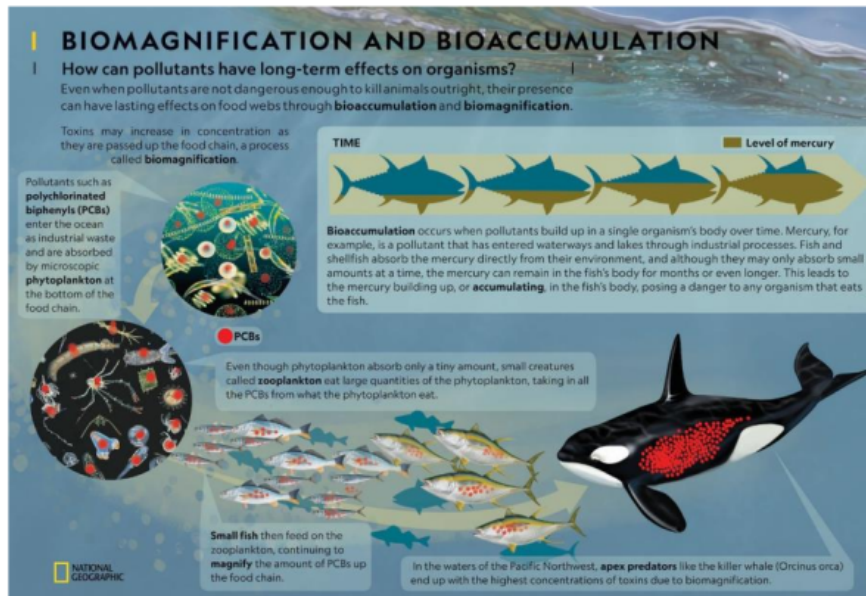
jangka panjang dari kontaminasi logam berat. Dengan mengidentifikasi spesies bioindikator utama dan memahami faktor-faktor yang memengaruhi proses ini, kita dapat memprediksi dampak potensial terhadap dinamika ekosistem dan kesehatan komunitas estuaria dengan lebih baik. Menerapkan strategi pengelolaan yang efektif untuk mengurangi masukan logam berat ke dalam lingkungan estuaria dan mengurangi risiko biomagnifikasi menjadi seruan mendesak untuk bertindak dalam menjaga integritas dan keberlanjutan ekologi ekosistem yang penting ini.

Kesimpulannya, dasar-dasar ekotoksikologi sangat penting dalam menangani interaksi yang kompleks antara logam berat dan ekosistem estuaria. Dasar-dasar ini menawarkan alat dan pemahaman yang diperlukan untuk mengevaluasi efek kontaminan sekaligus mengenali seluk-beluk lingkungan estuaria. Logam berat dapat meningkatkan toksisitas pada organisme akuatik, menyoroti kerentanan habitat ini dan menekankan perlunya studi spesifik spesies untuk menilai risiko ekologi secara akurat. Selain itu, proses bioakumulasi dan biomagnifikasi menimbulkan kekhawatiran tentang kontaminasi logam berat, sehingga menggarisbawahi pentingnya mengambil tindakan tegas untuk melindungi keseimbangan ekosistem muara. Dengan menerapkan penelitian ekotoksikologi yang komprehensif, kita dapat meletakkan dasar bagi strategi pengelolaan dan konservasi yang efektif yang memastikan kesehatan dan ketahanan ekologis yang tak ternilai ini. Prinsip-prinsip ekotoksikologi memberikan kerangka kerja yang kuat untuk memahami dampak logam berat dan memungkinkan kita untuk membuat keputusan yang tepat untuk melindungi ekosistem muara. Melalui penelitian dan pemantauan yang ketat, kami dapat mengidentifikasi sumber, jalur, dan dampak kontaminasi logam berat, sehingga kami dapat mengembangkan langkah-langkah mitigasi yang tepat sasaran.

Selain itu, ekotoksikologi memungkinkan kita untuk menilai efek jangka panjang dari paparan logam berat terhadap kesehatan ekosistem dan potensi pemulihan dan restorasi. Pengetahuan ini sangat penting untuk mengembangkan praktik dan kebijakan berkelanjutan yang meminimalkan risiko yang ditimbulkan oleh logam berat dan melindungi keanekaragaman hayati dan integritas ekologis ekosistem estuaria.

Dengan mempelajari interaksi antara logam berat dan organisme estuaria, kita dapat lebih memahami mekanisme toksisitas dan mengembangkan strategi untuk mengurangi dampaknya. Selain itu, ekotoksikologi memberikan wawasan tentang faktor-faktor yang memengaruhi ketersediaan hayati dan bioakumulasi logam berat, sehingga membantu mengidentifikasi titik-titik rawan dan spesies yang rentan. Informasi ini sangat penting untuk merancang program pemantauan yang efektif dan menerapkan tindakan manajemen yang ditargetkan. Singkatnya, dasar-dasar ekotoksikologi sangat penting untuk memahami dinamika yang kompleks antara logam berat dan ekosistem estuaria. Dengan menggunakan prinsip-prinsip ekotoksikologi, kita dapat meminimalkan risiko ekologis yang terkait dengan kontaminasi logam berat dan memastikan kelangsungan hidup jangka panjang dari kekayaan ekologis yang tak ternilai ini.





Gambar 7. Perbedaan antara bioakumulasi dan biomagnifikasi logam berat pada ikan

42

(Sumber: <https://www.nationalgeographic.org/activity/biomagnification-and-bioaccumulation/>)



## BAB 3

### Ekologi Ikan di Muara

---

#### 3.1. Keanekaragaman Hayati dan Peran Ekologis Ikan

Keanekaragaman hayati ikan di muara adalah bukti kekayaan kompleksitas ekosistem ini. Estuari, tempat bercampurnya air tawar dan <sup>24</sup>asin, merupakan lingkungan yang unik dan sangat produktif yang berfungsi sebagai tempat pembibitan yang penting bagi banyak spesies ikan. Beragam spesies ikan yang menghuni muara memainkan peran ekologis yang sangat penting, yang berkontribusi terhadap stabilitas dan fungsionalitas lingkungan yang dinamis ini. Komunitas ikan ini mencakup spektrum serikat trofik, mulai dari pemakan tumbuhan hingga pemangsa puncak, membentuk rantai makanan yang rumit yang memfasilitasi aliran energi dan siklus nutrisi.

Spesies ikan herbivora, seperti belanak dan ikan kakatua, membantu mengendalikan pertumbuhan vegetasi air yang terendam dengan mengonsumsi ganggang dan bahan tanaman lainnya. Perilaku merumput ini mencegah pertumbuhan vegetasi yang berlebihan, yang dapat menyebabkan penipisan oksigen dan penurunan spesies lain. Dengan menjaga keseimbangan ekosistem, ikan herbivora memastikan kelangsungan hidup vegetasi pembentuk habitat yang penting seperti lamun dan tanaman rawa asin.

Ikan predator, sebaliknya, mengatur populasi mangsa dan menjaga keseimbangan ekosistem. Contoh ikan predator yang biasa ditemukan di muara termasuk ikan *snook*, *red drum*, dan *striped bass*. Ikan-ikan ini memainkan peran penting dalam mengendalikan populasi ikan yang lebih kecil dan invertebrata, mencegah mereka menjadi terlalu banyak dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Dengan mengatur populasi mangsa, ikan predator membantu menjaga kesehatan dan keanekaragaman komunitas <sup>47</sup>muara.

Selain itu, muara menyediakan tempat berlindung dan sumber makanan yang melimpah bagi banyak ikan selama tahap awal kehidupan mereka. Perairan yang terlindung dan nutrisi yang melimpah

memungkinkan larva dan remaja ikan untuk menemukan tempat berlindung dari predator dan mengakses pasokan makanan yang stabil. Fungsi pembibitan ini sangat penting bagi banyak spesies ikan<sup>53</sup> yang bernilai komersial dan ekologis, karena muara berfungsi sebagai tempat berkembang biak dan menyediakan tempat berlindung bagi ikan-ikan muda yang rentan.

Tingginya tingkat produktivitas dan keanekaragaman hayati yang ditemukan di muara sangat erat kaitannya dengan karakteristik fisik lingkungan ini. Pencampuran air tawar dan air asin menciptakan berbagai salinitas, yang mendukung beragam spesies yang beradaptasi dengan kondisi yang berbeda. Selain itu, jaringan saluran, dataran pasang surut, dan rawa-rawa yang kompleks menyediakan berbagai habitat bagi ikan, mulai dari padang lamun yang dangkal hingga saluran yang lebih dalam dan terumbu tiram. Keragaman habitat ini memungkinkan hidup berdampingannya berbagai spesies ikan dengan kebutuhan ekologi yang berbeda-beda.

Kesimpulannya, keanekaragaman hayati ikan di muara mencerminkan jaringan interaksi ekologis yang rumit di dalam lingkungan yang unik ini. Keberadaan ikan pemakan tumbuhan dan ikan pemangsa membantu menjaga keseimbangan dan fungsi ekosistem muara. Fungsi pembibitan estuari sangat penting untuk kelangsungan hidup dan reproduksi populasi ikan, baik yang penting secara komersial maupun ekologis. Karakteristik fisik dan kompleksitas estuaria menyediakan banyak habitat dan sumber daya yang mendukung keanekaragaman spesies ikan yang ditemukan di ekosistem ini. Memahami dan melestarikan keanekaragaman hayati ikan di muara sangat penting untuk kesehatan dan ketahanan ekosistem yang berharga ini secara keseluruhan.

Selain itu, fenomena pergeseran ontogenetik pada spesies ikan muara merupakan aspek yang menarik dari sejarah hidup mereka. Banyak spesies menunjukkan perubahan yang berbeda dalam pemanfaatan habitat dan kebutuhan sumber daya saat mereka berkembang melalui tahap kehidupan yang berbeda. Secara khusus, ikan-ikan ini sering mencari habitat pembibitan di dalam muara selama fase remaja. Lingkungan yang terlindung ini memberikan manfaat penting seperti

perlindungan dari predator dan pasokan makanan yang melimpah, sehingga memungkinkan ikan-ikan remaja untuk tumbuh dan berkembang. Ketersediaan dan kualitas tempat pembibitan ini memainkan peran penting dalam menentukan keberhasilan rekrutmen, yang mengacu pada jumlah individu yang bertahan hidup hingga dewasa dan bergabung dengan populasi pembiakan. Oleh karena itu, gangguan pada habitat pembesaran ini dapat berdampak luas pada populasi ikan dan struktur ekosistem estuaria secara keseluruhan.

Salah satu faktor penting yang dapat mengganggu habitat pembibitan ini adalah kontaminasi logam berat. Muara sering menjadi tempat tertampungnya berbagai sumber polusi, termasuk limpasan industri dan pertanian, yang dapat memasukkan logam berat ke dalam air. Logam-logam ini, seperti merkuri, timbal, dan kadmium, bersifat toksik bagi organisme air dan dapat terakumulasi dalam sedimen muara. Karena ikan-ikan remaja bergantung pada sedimen ini sebagai habitat dan sumber makanan mereka, mereka sangat rentan terhadap dampak buruk kontaminasi logam berat.

Konsekuensi kontaminasi logam berat pada populasi ikan estuaria bisa sangat besar. Pertama, paparan logam berat dalam jumlah yang tinggi dapat secara langsung membahayakan kesehatan dan kelangsungan hidup ikan-ikan remaja. Kontaminan ini dapat mengganggu pertumbuhan mereka, mengganggu kemampuan reproduksi mereka, dan melemahkan sistem kekebalan tubuh mereka, membuat mereka lebih rentan terhadap penyakit. Selain itu, logam berat dapat terakumulasi secara biologis dalam jaringan ikan dari waktu ke waktu, sehingga menimbulkan efek jangka panjang pada individu dan berpotensi meneruskan kontaminan ini ke tingkat trofik yang lebih tinggi dalam rantai makanan.

Di luar dampak langsung pada ikan, gangguan pada habitat pembibitan dapat memiliki efek berjenjang pada struktur komunitas ikan yang lebih luas di muara. Ekosistem estuaria saling berhubungan secara rumit, dan perubahan pada satu komponen dapat bergema di seluruh sistem. Sebagai contoh, jika kontaminasi logam berat mengurangi ketersediaan tempat pembibitan yang cocok untuk remaja atau mengurangi pasokan makanan mereka, hal ini dapat mengurangi

keberhasilan rekrutmen. Polutan, pada gilirannya, dapat menyebabkan penurunan kelimpahan dan keanekaragaman populasi ikan dewasa, karena lebih sedikit spesies yang bertahan hidup hingga dewasa dan berkontribusi pada kolam pembiakan. Hilangnya spesies ikan yang penting dapat mengganggu interaksi ekologis, termasuk predasi, kompetisi, dan hubungan trofik, yang selanjutnya dapat berdampak pada organisme lain di dalam ekosistem muara.

Singkatnya, pergeseran ontogenetik yang ditunjukkan oleh spesies ikan muara, yang memanfaatkan habitat dan sumber daya yang berbeda pada berbagai tahap kehidupan, sangat penting untuk kelangsungan hidup dan dinamika populasi mereka. Habitat pembesaran yang disediakan oleh muara memainkan peran penting dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan ikan remaja, mempengaruhi keberhasilan rekrutmen mereka, dan pada akhirnya membentuk struktur komunitas ikan secara keseluruhan dalam ekosistem ini. Gangguan pada habitat pembibitan ini, seperti kontaminasi logam berat, dapat menimbulkan konsekuensi yang besar bagi populasi ikan, yang memengaruhi kesehatan, kelangsungan hidup, dan kemampuan reproduksi mereka. Selain itu, gangguan ini dapat memiliki efek lanjutan pada seluruh ekosistem estuaria, yang berpotensi mengubah interaksi ekologis dan mengancam stabilitas habitat yang berharga ini.

### 3.2. Habitat dan Persebaran Ikan di Muara

Distribusi spesies ikan di dalam muara terkait erat dengan beragam habitat yang ada di lingkungan yang dinamis ini. Estuari, tempat pertemuan air tawar dan air asin, menawarkan berbagai macam relung yang mendukung berbagai macam spesies ikan. Habitat ini meliputi padang lamun, rawa asin, dataran lumpur, dan saluran pasang surut, yang masing-masing memberikan karakteristik dan sumber daya yang unik bagi ikan.

Padang lamun, misalnya, berfungsi sebagai tempat pembibitan yang penting bagi banyak spesies ikan. Vegetasi yang lebat menyediakan tempat berlindung dan perlindungan bagi ikan remaja, sehingga mereka dapat tumbuh dan berkembang dengan aman. Padang lamun

menawarkan sumber makanan yang melimpah, seperti invertebrata kecil dan ganggang, yang menarik spesies ikan herbivora dan omnivora.

Rawa-rawa garam, di sisi lain, dicirikan oleh banjir pasang surut dan keberadaan tanaman yang tahan terhadap garam. Habitat ini menyediakan zona transisi antara daratan dan perairan, bertindak sebagai penyangga terhadap erosi dan menyaring polutan. Spesies ikan yang menghuni rawa-rawa asin beradaptasi untuk mentolerir berbagai tingkat salinitas dan bergantung pada pasokan makanan yang melimpah di dalam ekosistem rawa.

Dataran lumpur, yang terekspos <sup>63</sup> pada saat air surut dan terendam pada saat air pasang, kaya akan bahan organik dan menjadi tempat mencari makan bagi banyak spesies ikan. Sedimen lunak rawa lumpur menjadi <sup>62</sup> tempat hidup berbagai invertebrata, seperti cacing dan krustasea, yang menjadi sumber makanan bagi ikan-ikan yang hidup di dasar rawa. Ketersediaan makanan dan perlindungan yang ditawarkan oleh rawa lumpur menjadikannya habitat yang menarik bagi banyak spesies ikan.

Saluran pasang surut, saluran utama aliran air di dalam muara, juga memainkan peran penting dalam distribusi ikan. Saluran ini menghubungkan habitat yang berbeda dan memfasilitasi pergerakan ikan di antara mereka. Saluran ini berfungsi sebagai rute migrasi bagi banyak spesies, memungkinkan mereka untuk mengakses sumber daya yang berbeda saat pasang surut berubah. Saluran pasang surut juga sangat penting untuk mengangkut nutrisi dan bahan organik, yang menopang rantai makanan di muara sungai.

Pola distribusi ikan di dalam muara dipengaruhi oleh variasi habitat yang tersedia dan variabilitas spasial dan temporal dari habitat tersebut. Siklus pasang surut air laut menyebabkan permukaan air naik dan turun, menciptakan lingkungan yang dinamis di mana ikan harus beradaptasi dengan kondisi yang berubah-ubah. Gradien salinitas, yang dihasilkan dari pencampuran air tawar dan air asin, menciptakan zona yang berbeda di dalam muara yang cocok untuk spesies ikan yang berbeda. Perubahan musiman, seperti fluktuasi suhu dan ketersediaan makanan, selanjutnya akan berdampak pada pola distribusi ikan.

Kesimpulannya, distribusi spesies ikan di dalam muara sangat terkait dengan beragam habitat yang ada di lingkungan yang dinamis ini. Padang lamun, rawa-rawa asin, rawa-rawa lumpur, dan saluran pasang surut di dalam muara menawarkan sumber daya dan kondisi unik yang mendukung berbagai spesies ikan. Variabilitas spasial dan temporal dari habitat-habitat ini menambah kompleksitas pada pola distribusi ikan, sehingga membuat estuari menjadi ekosistem yang menarik untuk dipelajari dan dilindungi.

Distribusi spesies ikan di lingkungan estuaria merupakan indikator penting bagi kesehatan dan status ekologi ekosistem ini secara keseluruhan. Estuari merupakan daerah yang dinamis dan merupakan daerah transisi di mana air tawar dan air asin bercampur, menciptakan habitat unik yang mendukung beragam spesies ikan. Namun, lingkungan ini rentan terhadap aktivitas manusia dan polusi, yang dapat membahayakan integritas ekologisnya. Spesies ikan tertentu rentan terhadap perubahan kualitas air dan perubahan habitat, sehingga menjadi indikator awal yang sangat baik untuk mengetahui degradasi lingkungan dan pencemaran logam berat. Dengan memantau distribusi spasial dan kelimpahan spesies ikan tertentu, para ilmuwan dan peneliti dapat memperoleh wawasan yang berharga mengenai dampak kontaminasi logam berat pada ekosistem estuaria. Perubahan ada atau tidaknya spesies indikator ini dapat memberikan informasi penting tentang kondisi kualitas air dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan.

Selain itu, memahami preferensi habitat dan pola migrasi ikan di muara dapat menjadi penting untuk merancang dan menerapkan strategi konservasi dan pengelolaan yang ditargetkan. Dengan mengidentifikasi area sensitif dan melindungi populasi ikan yang rentan, kita dapat memastikan keberlanjutan dan ketahanan jangka panjang lingkungan muara. Pengetahuan ini dapat membantu mendasari proses pengambilan keputusan dan memandu upaya-upaya untuk mengurangi dampak negatif dari polusi dan degradasi habitat. Pada akhirnya, distribusi spesies ikan di muara adalah alat yang ampuh untuk menilai dan mengelola kesehatan ekosistem vital ini.

### 3.3. Adaptasi Fisiologis Ikan terhadap Cekaman Logam Berat<sup>15</sup>

Ikan muara, yaitu ikan yang hidup di daerah pesisir di mana air tawar dan air asin bercampur, telah mengembangkan adaptasi fisiologis yang luar biasa untuk mengatasi tekanan paparan logam berat. Adaptasi ini tidak hanya memungkinkan kelangsungan hidup mereka, tetapi juga memungkinkan mereka untuk berkembang di lingkungan yang menantang ini. Salah satu adaptasi tersebut adalah induksi protein pengikat logam, seperti metallothionein, yang sangat penting dalam mengasinkan dan mendetoksifikasi logam berat dalam jaringan ikan. Metallothionein adalah protein kecil yang kaya sistein dengan afinitas tinggi untuk mengikat ion logam berat. Metallothionein mengaisnya dari jaringan di sekitarnya dengan mengikat ion-ion beracun ini, membatasi toksisitasnya dan mencegah kerusakan sel. Kemampuan untuk mengikat dan menyerap logam berat ini sangat penting untuk kelangsungan hidup ikan estuaria, karena lingkungan ini sering kali mengandung polutan tingkat tinggi dari limpasan industri dan perkotaan.

Selain protein pengikat logam, ikan muara menunjukkan mekanisme ekskresi yang efisien untuk menghilangkan akumulasi logam berat dari tubuhnya. Hal ini sangat penting untuk menjaga homeostasis logam internal dan mencegah kelebihan logam, yang dapat membahayakan kesehatan dan kesejahteraan ikan secara keseluruhan. Berbagai jalur ekskresi menghilangkan logam berat, termasuk insang, ginjal, dan usus. Insang, misalnya, memainkan peran penting dalam menghilangkan logam melalui difusi pasif dan mekanisme transpor aktif. Di sisi lain, ginjal bertanggung jawab untuk menyaring darah dan mengeluarkan produk limbah, termasuk logam berat, melalui urine. Terakhir, usus berkontribusi pada ekskresi dengan menghilangkan logam berat dalam makanan yang dicerna.

Adaptasi fisiologis ikan muara ini menyoroti kemampuan mereka yang luar biasa untuk mengatasi paparan logam berat dan berkembang di lingkungan yang menantang. Namun, penting untuk dicatat bahwa paparan logam berat dalam jangka waktu lama masih dapat berdampak buruk pada ikan-ikan ini, bahkan dengan adaptasi mereka. Akumulasi logam berat dalam jaringan mereka dapat menyebabkan gangguan fisiologis dan biokimia, mengganggu kesehatan, reproduksi, dan

kelangsungan hidup mereka secara keseluruhan. Selain itu, dampak paparan logam berat pada ikan estuaria tidak hanya pada kesehatannya, karena ikan estuaria dapat menjadi bioindikator pencemaran lingkungan. Pemantauan kesehatan dan kelimpahan populasi ikan estuaria dapat memberikan wawasan yang berharga tentang kesehatan ekosistem mereka secara keseluruhan dan membantu mendasari upaya konservasi. Secara keseluruhan, adaptasi fisiologis ikan estuaria terhadap paparan logam berat menyoroti ketahanan mereka dan menjadi bukti kemampuan beradaptasi yang luar biasa dalam menghadapi tantangan lingkungan.

Selain itu, toleransi ikan muara terhadap tekanan logam berat tidak seragam pada semua spesies. Sementara beberapa ikan menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap logam berat, ikan lainnya dapat merasakan dampak buruk yang parah bahkan pada konsentrasi yang rendah. Variabilitas dalam toleransi ini dapat dikaitkan dengan berbagai faktor, termasuk sifat fisiologis yang melekat, tahap kehidupan, karakteristik spesifik spesies, dan status kesehatan spesies secara keseluruhan.

Spesies ikan tertentu telah mengembangkan adaptasi fisiologis yang memungkinkan mereka untuk bertahan dari paparan logam berat yang lebih tinggi. Adaptasi ini dapat mencakup mekanisme detoksifikasi yang ditingkatkan, penyerapan logam yang efisien, atau kemampuan untuk mengeluarkan logam secara lebih efektif. Sebagai contoh, beberapa ikan muara memiliki tingkat protein pengikat logam yang lebih tinggi yang membantu mereka mengikat dan mendetoksifikasi logam berat, sehingga mengurangi efeknya yang berbahaya. Spesies semacam itu, yang <sup>26</sup>ing disebut spesies "toleran terhadap logam" atau "tahan logam", dapat bertahan hidup dan berkembang biak di lingkungan yang sangat terkontaminasi logam.

Di sisi lain, beberapa spesies ikan menunjukkan toleransi yang lebih rendah terhadap logam berat. Spesies-spesies ini mungkin tidak memiliki adaptasi fisiologis yang diperlukan untuk mengatasi paparan logam, sehingga mereka lebih rentan terhadap efek toksik logam berat. Logam berat dapat mengganggu proses fisiologis yang vital, seperti regulasi ion, fungsi enzim, dan respons stres oksidatif, bahkan pada konsentrasi yang relatif rendah. Akibatnya, ikan-ikan ini dapat mengalami penurunan



pertumbuhan, gangguan reproduksi, gangguan fungsi kekebalan tubuh, dan peningkatan tingkat kematian.

Penting juga untuk mempertimbangkan pengaruh tahap kehidupan terhadap toleransi logam pada ikan muara. Beberapa spesies mungkin lebih rentan terhadap toksisitas logam berat selama tahap-tahap kehidupan tertentu, seperti perkembangan awal atau fase reproduksi. Kerentanan ini dapat dikaitkan dengan perbedaan tuntutan fisiologis, seperti peningkatan alokasi energi untuk pertumbuhan atau reproduksi, yang dapat membuat mereka lebih sensitif terhadap efek toksik logam berat.

Karakteristik spesifik spesies lebih lanjut berkontribusi pada variabilitas toleransi logam di antara ikan estuaria. Spesies yang berbeda mungkin memiliki tingkat pengangkut logam, protein pengikat logam, atau aktivitas enzimatis yang berbeda yang terlibat dalam detoksifikasi logam. Sifat-sifat spesifik spesies ini menentukan bagaimana ikan merespons paparan logam berat dan pada akhirnya membentuk toleransi mereka secara keseluruhan.

Terakhir, status kesehatan individu dapat secara signifikan memengaruhi kerentanan mereka terhadap stres logam berat. Ikan yang telah terganggu oleh stresor lingkungan lainnya, seperti polusi, degradasi habitat, atau penyakit, mungkin memiliki kemampuan yang lebih rendah untuk mengatasi kontaminasi logam berat. Stresor tambahan ini dapat melemahkan pertahanan fisiologis mereka dan meningkatkan kerentanan mereka terhadap toksisitas logam.

Memahami adaptasi fisiologis dan variasi toleransi logam di antara ikan-ikan muara sangat penting untuk memprediksi kerentanan spesies ikan terhadap kontaminasi logam berat. Dengan menilai potensi dampak logam berat terhadap populasi ikan dan struktur komunitas, para ilmuwan dan pembuat kebijakan dapat mengembangkan strategi yang efektif untuk mengurangi dampak buruk pencemaran logam berat di ekosistem estuaria. Pengetahuan ini dapat menginformasikan upaya konservasi, langkah-langkah pengendalian polusi, dan pengembangan pedoman untuk pengelolaan habitat estuaria yang berkelanjutan.

Kesimpulannya, ekologi ikan di muara menunjukkan jaringan kehidupan yang rumit dan interaksi dinamis antara spesies ikan dan

15 habitatnya. Estuari adalah lingkungan yang unik di mana air tawar dan air asin bercampur, menciptakan beragam habitat yang mendukung berbagai spesies ikan. Ikan-ikan ini memainkan peran ekologis yang sangat penting di muara, berkontribusi pada siklus nutrisi, interaksi trofik, dan stabilitas ekosistem secara keseluruhan. Dengan memakan organisme yang lebih kecil dan detritus, ikan membantu menjaga keseimbangan populasi dan mencegah dominasi spesies tertentu. Selain itu, ikan juga berfungsi sebagai mangsa predator yang lebih besar, yang berkontribusi pada aliran energi dan rantai makanan di dalam ekosistem muara.

Distribusi ikan di dalam muara mencerminkan respons mereka terhadap berbagai habitat dan gradien lingkungan. Beberapa spesies ikan lebih menyukai air payau yang ditemukan lebih dekat ke muara sungai, sementara yang lain beradaptasi dengan kondisi yang lebih asin yang ditemukan lebih dekat ke laut. Pola distribusi ini tidak hanya menyoroti kemampuan beradaptasi ikan pada tingkat salinitas yang berbeda, tetapi juga bertindak sebagai indikator kesehatan lingkungan muara. Perubahan distribusi ikan dapat menandakan perubahan kualitas air, tingkat polusi, atau ketersediaan habitat, sehingga menjadi indikator yang berharga untuk memantau kesehatan lingkungan.

Memahami adaptasi fisiologis ikan terhadap tekanan logam berat memberikan wawasan penting tentang kapasitas mereka untuk mengatasi polusi. Muara sering mengalami polusi dari kegiatan industri, limpasan pertanian, dan pembangunan perkotaan, yang menyebabkan akumulasi logam berat di dalam air dan sedimen. Ikan yang menghuni muara ini telah mengembangkan berbagai mekanisme untuk menoleransi atau menghilangkan logam berat, seperti produksi metallothionein atau perubahan morfologi insang. Dengan mempelajari adaptasi ini, para ilmuwan dapat memperoleh pengetahuan yang berharga tentang dampak polusi terhadap populasi ikan dan kesehatan ekosistem muara secara keseluruhan.

Memahami ekologi ikan di muara sangat penting untuk memandu upaya konservasi dan strategi pengelolaan. Dengan menyadari pentingnya keanekaragaman hayati ikan dan peran ekologisnya, para pembuat kebijakan dan pengelola lingkungan dapat menerapkan langkah-langkah untuk melindungi dan memulihkan ekosistem muara. Upaya

konservasi termasuk membangun kawasan lindung, menerapkan praktik penangkapan ikan yang berkelanjutan, dan mengurangi masukan polusi. Strategi pengelolaan juga dapat melibatkan restorasi dan peningkatan habitat, seperti membuat terumbu karang buatan atau melestarikan tempat pemijahan yang kritis.

Kesimpulannya, ekologi ikan yang rumit di muara sangat penting untuk integritas fungsional dan kesehatan ekosistem kritis ini secara keseluruhan. Dengan mengkaji ekologi ikan secara komprehensif, kita dapat membuat keputusan yang tepat untuk mendorong pemanfaatan dan konservasi sumber daya muara secara berkelanjutan. Estuari adalah harta ekologis yang tak ternilai yang menyediakan berbagai layanan ekosistem, termasuk habitat pembibitan ikan, penyaringan air, dan perlindungan garis pantai. Kita harus menyadari pentingnya ekosistem ini dan mengambil langkah-langkah proaktif untuk melindungi populasi ikan dan integritas ekologi estuari secara keseluruhan untuk generasi mendatang.

## BAB 4

### Teknik *Biomonitoring* Logam Berat

---

#### 4.1. Strategi Pengambilan Sampel Air dan Sedimen

Strategi pengambilan sampel air dan sedimen yang akurat dan representatif sangat penting untuk *biomonitoring* logam berat yang efektif di muara. Sistem estuaria bersifat dinamis dan kompleks, menunjukkan variabilitas spasial dan temporal karena faktor-faktor seperti pasang surut air laut, aliran air tawar, dan aktivitas antropogenik. Oleh karena itu, sangat penting untuk menggunakan pendekatan komprehensif yang dapat menangkap sifat alami dari lingkungan ini.

Salah satu strategi yang banyak digunakan dalam *biomonitoring* estuaria adalah pengambilan sampel bertingkat. Metode ini melibatkan pembagian muara ke dalam zona yang berbeda berdasarkan gradien salinitas. Dengan demikian, para peneliti dapat menargetkan area yang cenderung memiliki tingkat paparan logam berat yang berbeda. Pendekatan ini memungkinkan pengumpulan sampel air dan sedimen yang lebih terfokus, sehingga dapat memastikan penilaian tingkat polusi yang lebih akurat.

Pengambilan sampel bertingkat menawarkan beberapa keuntungan dalam *biomonitoring* logam berat. Pertama, hal ini memungkinkan para peneliti untuk menangkap heterogenitas sistem estuaria. Daerah yang berbeda di dalam muara dapat memiliki tingkat kontaminasi logam berat yang berbeda-beda karena perbedaan sumber polutan, hidrodinamika, dan laju sedimentasi. Gambaran komprehensif tentang distribusi logam berat dapat diperoleh dengan memilih lokasi pengambilan sampel secara strategis di setiap zona.

Selain itu, pengambilan sampel bertingkat membantu mengidentifikasi titik-titik polusi potensial. Dengan menargetkan area dengan paparan logam berat yang lebih tinggi, para peneliti dapat menunjukkan dengan tepat daerah-daerah di mana tingkat polusi melebihi ambang batas yang dapat diterima. Informasi ini sangat penting

untuk menerapkan strategi mitigasi yang ditargetkan dan memprioritaskan upaya konservasi.

Selain itu, pengambilan sampel bertingkat meningkatkan keterwakilan sampel yang dikumpulkan. Muara sering ditandai dengan gradien salinitas, yang mempengaruhi distribusi dan perilaku logam berat. Dengan mempertimbangkan gradien ini, para peneliti dapat memastikan bahwa sampel yang dikumpulkan mewakili ekosistem muara. Gradien ini sangat penting ketika membuat kesimpulan yang lebih luas tentang polusi logam berat dan potensi dampaknya terhadap organisme air dan kesehatan manusia.

Kesimpulannya, strategi pengambilan sampel air dan sedimen yang akurat dan representatif sangat penting untuk *biomonitoring* logam berat yang efektif di muara. Dengan menggunakan pengambilan sampel bertingkat berdasarkan gradien salinitas, memungkinkan pengumpulan sampel yang ditargetkan dari berbagai daerah dengan berbagai tingkat paparan logam berat. Pendekatan ini memastikan penilaian yang lebih tepat terhadap tingkat polusi dan memungkinkan identifikasi titik-titik polusi potensial. Dengan menggunakan strategi komprehensif seperti itu, para peneliti dapat berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang kontaminasi logam berat dalam sistem estuaria dan memfasilitasi pengembangan langkah-langkah pengelolaan dan konservasi yang tepat.

Karena variabilitas dalam program pemantauan, penting untuk menggabungkan teknik pengambilan sampel secara langsung dan pengambilan sampel yang terintegrasi dengan waktu. Pengambilan sampel secara langsung memberikan data seketika yang berharga tentang konsentrasi logam berat pada waktu tertentu. Metode ini melibatkan pengumpulan sampel air di lokasi tertentu dan menganalisisnya dengan segera. Metode ini memungkinkan penilaian cepat terhadap tingkat polusi dan dapat sangat berguna dalam mengidentifikasi lonjakan jangka pendek atau peristiwa polusi.

Di sisi lain, pengambilan sampel yang terintegrasi dengan waktu memberikan wawasan tentang variasi konsentrasi logam berat dalam periode yang lebih lama. Teknik ini melibatkan penggunaan alat pengambil sampel pasif atau instrumen otomatis yang secara terus menerus mengumpulkan sampel air selama durasi tertentu. Dengan

mengintegrasikan efek perubahan kondisi lingkungan dan sumber polusi dari waktu ke waktu, pengambilan sampel terintegrasi waktu menawarkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang pola kontaminasi logam berat. Hal ini dapat membantu mengidentifikasi tren, variasi musiman, dan dampak jangka panjang pada ekosistem estuaria.

Ketika merancang program pemantauan, memilih lokasi pengambilan sampel yang tepat di dalam muara sangat penting. Program-program ini memastikan bahwa data yang dikumpulkan secara akurat mewakili kontaminasi logam berat di seluruh sistem. Program ini dapat secara efektif menangkap distribusi spasial polutan di dalam muara dengan memilih lokasi pengambilan sampel secara strategis di bagian hulu, tengah, dan hilir. Pendekatan ini sangat penting untuk mengidentifikasi sumber polusi dan memahami transportasi dan nasib logam berat di dalam lingkungan muara.

Dengan menggabungkan data dari berbagai lokasi di dalam muara, program pemantauan dapat memperoleh wawasan yang berharga tentang dinamika kontaminasi logam berat. Pendekatan terpadu ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang sumber, jalur, dan dampak polusi. Pendekatan ini juga memfasilitasi pengembangan strategi manajemen yang efektif dan upaya remediasi yang ditargetkan. Pada akhirnya, menggabungkan teknik pengambilan sampel yang terintegrasi dengan waktu dan memilih lokasi pengambilan sampel dengan hati-hati sangat penting untuk mengkarakterisasi dan mengelola kontaminasi logam berat di muara secara akurat.

#### 4.2. Pengambilan Sampel Jaringan Ikan: Metode Tidak Mematikan dan Mematikan

Jaringan ikan berfungsi sebagai indikator penting kontaminasi logam berat di muara, yang memberikan wawasan berharga tentang kesehatan ekosistem perairan. Namun, sampel tersebut harus dikumpulkan dengan hati-hati untuk organisme dan lingkungan. Metode pengambilan sampel yang tidak mematikan telah digunakan untuk meminimalkan kerusakan pada populasi ikan, seperti pemotongan sirip atau pengumpulan lendir kulit. Teknik-teknik ini menawarkan pendekatan yang tidak terlalu invasif, mengurangi stres dan potensi kematian yang

terkait dengan metode pengambilan sampel tradisional yang mematikan. Dengan menggunakan pengambilan sampel yang tidak mematikan, para peneliti dapat memperoleh informasi penting mengenai paparan logam berat dan konsentrasi jaringan pada ikan, sehingga memungkinkan mereka untuk melacak perubahan tingkat kontaminasi dari waktu ke waktu.

Menggunakan metode pengambilan sampel yang tidak mematikan sangat bermanfaat dalam studi pemantauan jangka panjang yang memerlukan pengambilan sampel berulang. Metode-metode ini memungkinkan para peneliti untuk menilai bioakumulasi logam berat dalam jaringan ikan tanpa menyebabkan kerusakan yang signifikan pada individu atau populasinya. Selain itu, metode pengambilan sampel yang tidak mematikan sering kali lebih hemat biaya dan lebih sedikit memakan waktu dibandingkan dengan pengambilan sampel yang mematikan, karena metode ini tidak memerlukan pengorbanan ikan dan proses padat karya yang terkait.

Namun, sangat penting untuk diketahui bahwa pengambilan sampel yang tidak mematikan mungkin tidak cocok untuk semua spesies ikan. Beberapa spesies mungkin lebih sensitif terhadap penanganan atau perlu memproduksi lendir dalam jumlah yang cukup atau menumbuhkan sirip dengan cepat. Oleh karena itu, efektivitas dan penerapan metode pengambilan sampel yang tidak mematikan harus divalidasi untuk setiap spesies target sebelum diterapkan secara luas. Proses validasi ini melibatkan perbandingan hasil yang diperoleh dari pengambilan sampel yang tidak mematikan dengan hasil yang diperoleh dari metode pengambilan sampel yang mematikan secara tradisional untuk memastikan keakuratan dan keandalan data yang dikumpulkan.

Pendekatan komprehensif yang menggabungkan pengambilan sampel yang tidak mematikan dengan teknik pelengkap, seperti analisis jaringan atau histopatologi, harus dipertimbangkan untuk memahami kontaminasi logam berat di muara. Meskipun teknik-teknik ini memberikan informasi yang berharga tentang paparan logam berat dan konsentrasi jaringan, teknik-teknik ini mungkin tidak dapat menangkap aspek-aspek tertentu dari kontaminasi, seperti distribusi logam di dalam organ yang berbeda atau efek paparan jangka panjang. Oleh karena itu,

sangat penting untuk mempertimbangkan potensi keterbatasan metode pengambilan sampel yang tidak mematikan.

Kesimpulannya, metode pengambilan sampel yang tidak mematikan menawarkan pendekatan yang tidak terlalu invasif dan lebih berkelanjutan untuk menilai kontaminasi logam berat pada jaringan ikan di muara. Metode ini meminimalkan bahaya terhadap populasi ikan, memberikan informasi berharga tentang paparan dan konsentrasi jaringan, serta memungkinkan pemantauan tingkat kontaminasi dalam jangka panjang. Namun, kesesuaian dan keandalan metode-metode ini harus divalidasi untuk setiap spesies target, dan keterbatasannya harus dipertimbangkan dalam penilaian kontaminasi logam berat secara keseluruhan. Para peneliti dapat memahami dampak kontaminasi logam berat terhadap ekosistem estuaria dengan menggunakan kombinasi pengambilan sampel yang tidak mematikan dan teknik pelengkap.

Jika metode non-mematikan tidak mencukupi, pengambilan sampel jaringan ikan yang mematikan mungkin diperlukan untuk mendapatkan data yang komprehensif tentang akumulasi logam berat. Metode ini membutuhkan pertimbangan yang cermat untuk memastikan bahwa pemindahan individu tidak membahayakan populasi secara keseluruhan. Para peneliti harus memprioritaskan ukuran sampel, dengan mempertimbangkan potensi dampak ekologis dari tindakan mereka. Memilih spesies yang tidak terancam punah dan berlimpah untuk pengambilan sampel yang mematikan sangat penting untuk meminimalkan dampak buruk pada ekosistem. Selain itu, memahami potensi respons stres yang disebabkan oleh prosedur pengambilan sampel sangat penting. Dengan demikian, para peneliti dapat memastikan bahwa data yang dikumpulkan secara akurat mencerminkan kondisi alami dan menghindari bias yang disebabkan oleh perubahan yang disebabkan oleh stres pada pola akumulasi logam berat. Mencapai keseimbangan antara teknik yang tidak mematikan dan mematikan sangat penting dalam mengumpulkan wawasan yang berharga tentang pola bioakumulasi logam berat pada ikan muara dengan tetap menjaga integritas dan kesehatan ekosistem. Mematuhi pedoman etika selama proses pengambilan sampel merupakan hal yang sangat penting untuk



memastikan pelaksanaan penelitian yang bertanggung jawab dan berkelanjutan di bidang ini.

99

#### 4.3. Teknik Analisis untuk Analisis Logam Berat

Analisis konsentrasi logam berat dalam air, sedimen, dan jaringan ikan secara akurat dan sensitif merupakan hal yang sangat penting dalam studi *biomonitoring* yang kuat. Studi-studi ini memainkan peran penting dalam menilai dampak kontaminasi logam berat terhadap ekosistem akuatik dan kesehatan manusia. Teknik analisis tersedia untuk mencapai hasil yang dapat diandalkan, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasan tertentu.

Dua metode analisis air dan sedimen yang banyak digunakan adalah Spektrometri Massa-Plasma Tergabung (ICP-MS) dan Spektrometri Penyerapan Atom (AAS). Kedua teknik ini menawarkan batas deteksi dan ketepatan yang sangat baik, sehingga menjadikannya alat yang berharga untuk memantau konsentrasi logam berat. ICP-MS sangat menguntungkan karena kemampuannya untuk mengkuantifikasi beberapa logam berat dalam satu analisis secara bersamaan. ICP-MS memungkinkan para peneliti untuk mendapatkan informasi yang komprehensif tentang keberadaan dan tingkat berbagai logam berat dalam matriks estuaria, dengan sensitivitas yang tinggi dan rentang dinamis yang luas. Kemampuan ini sangat penting untuk memahami status kontaminasi secara keseluruhan dan mengidentifikasi sumber pencemaran potensial.

Di sisi lain, AAS adalah teknik ampuh lain yang biasa digunakan untuk analisis logam berat. AAS memberikan pengukuran logam berat yang andal dan akurat dalam sampel air dan sedimen. AAS bekerja dengan mengukur penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu, sehingga memungkinkan kuantifikasi konsentrasi logam. Meskipun AAS tidak memiliki kemampuan multi-elemen secara simultan seperti ICP-MS, AAS mengimbangi keterbatasan ini dengan kesederhanaan, keefektifan biaya, dan kemudahan penggunaannya. AAS juga dikenal dengan keandalan dan kemampuannya untuk menangani matriks sampel yang kompleks, sehingga menjadikannya pilihan populer di banyak laboratorium analisis.

Para peneliti dapat memperoleh data yang tepat dan dapat diandalkan mengenai konsentrasi logam berat dalam air, sedimen, dan jaringan ikan dengan menggunakan teknik analisis ini. Informasi ini sangat penting untuk menilai potensi risiko kontaminasi logam berat dan memandu strategi manajemen yang efektif. Studi *biomonitoring* mengandalkan analisis yang akurat dan sensitif untuk menyediakan data yang diperlukan bagi pembuat kebijakan dan lembaga lingkungan hidup untuk membuat keputusan yang tepat dalam melindungi dan melestarikan ekosistem perairan. Oleh karena itu, pemilihan teknik analisis yang tepat, seperti ICP-MS dan AAS, sangat penting untuk memastikan keberhasilan studi *biomonitoring* ini dan pelestarian lingkungan kita dan

Analisis jaringan ikan adalah proses penting yang menuntut persiapan sampel khusus dan metode pencernaan untuk secara efektif melepaskan logam berat yang terikat untuk dianalisis. Hal ini dikarenakan logam berat dapat terikat erat dalam jaringan ikan, sehingga diperlukan teknik khusus untuk mengekstraksi logam berat tersebut untuk analisis yang akurat. Dua metode standar yang digunakan dalam analisis jaringan ikan adalah Spektrometri Massa Plasma Tergabung (ICP-MS) dan Spektroskopi Penyerapan Atom (AAS). Teknik-teknik ini sangat cocok untuk menganalisis logam berat dalam jaringan ikan dan memberikan informasi berharga mengenai konsentrasinya. Namun, teknik lain menawarkan wawasan tambahan mengenai spesiasi dan bentuk kimiawi dari akumulasi logam berat dalam jaringan ikan. Misalnya, teknik *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat memberikan informasi mengenai komposisi unsur dalam jaringan ikan.

Di sisi lain, Spektroskopi Penyerapan Sinar-X (*X-ray Absorption Spectroscopy*, XAS) berbasis sinkrotron merupakan teknik yang ampuh yang dapat memberikan informasi rinci tentang spesies kimiawi logam berat. Memahami jenis kimiawi logam berat merupakan hal yang sangat penting dalam analisis jaringan ikan karena dapat membantu memahami ketersediaan hayati, mobilitas, dan potensi toksisitasnya terhadap organisme air dan manusia. Dengan mengidentifikasi bentuk kimiawi logam berat, para peneliti dapat memperoleh wawasan yang berharga tentang bagaimana zat beracun ini berperilaku di lingkungan akuatik dan

potensi risiko yang ditimbulkannya terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.

Selain itu, keakuratan dan efektivitas hasil analisis bergantung pada protokol jaminan kualitas dan kontrol kualitas (QA/QC) yang ketat. Dalam penelitian ilmiah, khususnya dalam menganalisis logam berat dalam studi *biomonitoring* estuaria, sangat penting untuk menerapkan langkah-langkah QA/QC yang kuat untuk memastikan keabsahan data. Beberapa komponen utama berkontribusi dalam proses ini.

Pertama, blanko analitik, bahan referensi bersertifikat, dan blanko prosedural dalam setiap *batch* analitik sangat penting. Blanko analitik berfungsi sebagai ukuran untuk mengidentifikasi dan memantau sumber kontaminasi potensial selama analisis. Peneliti dapat menentukan apakah kontaminasi terjadi selama pengumpulan, persiapan, atau analisis sampel dengan menganalisis sampel kosong. Di sisi lain, bahan referensi bersertifikat adalah sampel terstandarisasi dengan konsentrasi logam berat target yang telah diketahui. Bahan-bahan ini berfungsi sebagai tolok ukur untuk memvalidasi keakuratan dan ketepatan metode analisis. Blanko prosedural, serupa dengan blanko analitik, adalah sampel yang menjalani seluruh prosedur analitik namun tidak mengandung analit target. Blanko ini bertujuan untuk memeriksa potensi kontaminasi yang mungkin terjadi selama proses analisis. Dengan menyertakan blanko ini di setiap *batch*, peneliti dapat dengan yakin menilai keandalan hasil analisis mereka.

Selain menggunakan blanko dan bahan referensi, partisipasi rutin dalam skema pengujian kemahiran dan perbandingan antar-laboratorium sangat dianjurkan. Skema pengujian kemahiran melibatkan analisis sampel yang tidak diketahui yang disediakan oleh organisasi eksternal. Para peneliti akan dapat mengevaluasi akurasi dan presisi metode analisis mereka dan membandingkan hasil mereka dengan laboratorium lain saat berpartisipasi dalam skema ini. Skema ini tidak hanya membantu mengidentifikasi potensi kesalahan analisis tetapi juga memastikan konsistensi dan komparabilitas data di seluruh kelompok penelitian yang berbeda. Perbandingan antar laboratorium melibatkan pertukaran sampel antar laboratorium untuk dianalisis. Protokol ini memungkinkan untuk menilai variabilitas antar-laboratorium dan mengidentifikasi bias

sistematis yang mungkin ada di antara laboratorium yang berbeda. Perbandingan semacam itu sangat penting dalam meningkatkan keandalan dan kredibilitas analisis logam berat secara keseluruhan dalam studi *biomonitoring* estuaria.

Kesimpulannya, keakuratan dan keandalan hasil analisis dalam studi *biomonitoring* estuaria sangat bergantung pada penerapan protokol QA/QC yang ketat. Bahan referensi analitik dan bersertifikat serta blanko prosedural membantu memantau sumber kontaminasi potensial dan memvalidasi keakuratan analisis. Selain itu, keterlibatan dalam skema pengujian kelayakan dan perbandingan antar laboratorium memastikan konsistensi dan komparabilitas data di antara kelompok penelitian yang berbeda. Dengan mematuhi langkah-langkah pengendalian kualitas ini, para peneliti dapat dengan percaya diri menghasilkan data yang andal dan dapat dipercaya, yang pada akhirnya berkontribusi dalam memajukan pengetahuan ilmiah dan pengelolaan lingkungan yang efektif.

Kesimpulannya, keberhasilan *biomonitoring* logam berat di muara terletak pada penerapan teknik pengambilan sampel dan analisis yang kuat dan ilmiah. Estuari merupakan ekosistem yang dinamis dan kompleks yang berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies tumbuhan dan hewan. Namun, estuari juga rentan terhadap kontaminasi logam berat, yang dapat menimbulkan konsekuensi yang parah bagi kesehatan dan fungsi ekosistem ini. Oleh karena itu, sangat penting untuk menggunakan strategi *biomonitoring* yang efektif untuk menilai dampak kontaminasi logam berat dan mengembangkan langkah-langkah pengelolaan dan konservasi yang tepat.

Strategi pengambilan sampel air dan sedimen yang strategis sangat penting untuk keberhasilan *biomonitoring* logam berat di muara. Strategi ini melibatkan pemilihan lokasi pengambilan sampel yang representatif dan pengumpulan sampel secara teratur untuk menangkap variasi konsentrasi logam berat dari waktu ke waktu. Dengan menggunakan teknik pengambilan sampel yang sistematis, para peneliti dapat memperoleh data yang komprehensif mengenai distribusi dan tingkat logam berat di lingkungan estuaria.

Selain pengambilan sampel air dan sedimen, metode pengambilan sampel jaringan ikan yang tidak mematikan dan mematikan memainkan

peran penting dalam upaya *biomonitoring* estuaria. Ikan adalah indikator yang sangat baik untuk kontaminasi logam berat karena kemampuannya untuk mempertahankan dan mengakumulasi zat-zat ini di dalam jaringannya. Teknik pengambilan sampel yang tidak mematikan, seperti pemotongan sirip atau penghilangan sisik, memungkinkan pengumpulan sampel jaringan tanpa menyebabkan kerusakan pada ikan. Sampel-sampel ini kemudian dapat dianalisis untuk menentukan konsentrasi logam berat dan menilai paparan serta potensi dampaknya terhadap populasi ikan.

Metode pengambilan sampel jaringan ikan yang mematikan melibatkan pengorbanan individu-individu tertentu untuk dianalisis. Meskipun hal ini dapat menimbulkan pertimbangan etis, metode ini memberikan informasi yang berharga mengenai bioakumulasi dan biomagnifikasi logam berat di dalam rantai makanan di laut. Dengan mempelajari konsentrasi logam berat di berbagai tingkat trofik, para peneliti dapat memperoleh wawasan tentang transfer dan amplifikasi kontaminan di dalam ekosistem.

Kita harus memastikan penentuan konsentrasi logam berat yang akurat dan tepat, dan sangat penting untuk menggunakan teknik analisis canggih dengan langkah-langkah jaminan kualitas dan kontrol kualitas (QA/QC) yang ketat. Teknik-teknik ini meliputi spektroskopi serapan atom, spektrometri massa plasma yang digabungkan secara induktif, dan metode canggih lainnya untuk mendeteksi dan mengukur logam berat pada tingkat yang sangat kecil. Dengan menerapkan protokol QA/QC yang ketat, para peneliti dapat meminimalkan kesalahan pengukuran dan memastikan keandalan data yang diperoleh.

Data yang dikumpulkan melalui pengambilan sampel yang kuat dan teknik analisis dalam *biomonitoring* logam berat pada akhirnya memberikan dasar untuk merumuskan strategi pengelolaan dan konservasi yang ditargetkan. Dengan memahami dinamika kontaminasi logam berat di muara, pembuat kebijakan, dan manajer lingkungan dapat membuat keputusan yang tepat untuk mengurangi dampak dan melindungi ekosistem penting ini. Pendekatan ini dapat melibatkan penerapan langkah-langkah pengendalian polutan, mendirikan kawasan

lindung, atau mempromosikan praktik-praktik berkelanjutan untuk mengurangi masukan logam berat.

Kesimpulannya, keberhasilan *biomonitoring* logam berat di muara bergantung pada integrasi metodologi pengambilan sampel yang strategis dan teknik analisis yang canggih. Dengan menjunjung tinggi ketelitian ilmiah dan pertimbangan etika dalam pendekatan *biomonitoring* kami, kami dapat memahami dinamika logam berat di muara sungai secara komprehensif dan berupaya melindungi ekosistem penting ini untuk generasi mendatang.

## BAB 5

### Bioindikator dalam Tindakan: Studi Kasus

---

#### 5.1. Tanggapan Spesifik Spesies terhadap Kontaminasi Logam Berat

Studi kasus yang meneliti respons spesifik spesies terhadap kontaminasi logam berat di muara memberikan wawasan penting tentang konsekuensi ekologis dari polusi pada populasi ikan. Muara berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies ikan, dan kesehatan serta kesejahteraan mereka dapat dipengaruhi secara signifikan oleh logam berat di lingkungannya. Logam berat seperti kadmium, timbal, dan merkuri dapat masuk ke dalam muara melalui berbagai sumber, termasuk limbah industri, limpasan pertanian, dan pengendapan di atmosfer.

Spesies ikan yang berbeda menunjukkan kepekaan dan toleransi yang berbeda-beda terhadap logam berat, yang dapat menghasilkan respons biologis yang beragam. Beberapa spesies mungkin telah mengembangkan mekanisme untuk menoleransi atau mendetoksifikasi logam berat, yang memungkinkan mereka untuk berkembang di lingkungan yang terkontaminasi logam. Spesies-spesies ini tahan atau toleran terhadap logam, dan kemampuan mereka untuk bertahan hidup di habitat yang tercemar dapat memiliki implikasi penting bagi ekosistem. Di sisi lain, spesies ikan tertentu mungkin lebih sensitif terhadap logam berat dan mengalami efek yang merugikan bahkan pada konsentrasi yang rendah. Ketika terpapar kontaminasi logam berat, spesies-spesies ini dapat menunjukkan penurunan tingkat pertumbuhan, gangguan reproduksi, atau peningkatan kematian.

Memahami respons spesifik spesies ini sangat penting untuk memprediksi pergeseran dalam komposisi komunitas dan mengidentifikasi potensi pemenang dan pecundang dalam menghadapi polusi logam berat. Kehadiran spesies yang tahan terhadap logam dalam ekosistem estuaria dapat menyebabkan perubahan dominasi spesies dan mengubah struktur komunitas. Sebagai contoh, spesies yang tahan terhadap logam dapat mengungguli spesies yang sensitif dalam memperebutkan sumber daya, yang menyebabkan penurunan

kelimpahan atau bahkan kepunahan spesies tersebut. Situasi ini dapat mengakibatkan hilangnya keanekaragaman hayati dan mengganggu fungsi ekosistem.

Lebih jauh lagi, dampak kontaminasi logam berat terhadap populasi ikan dapat meluas hingga ke tingkat spesies. Predator yang mengandalkan ikan yang terkontaminasi sebagai sumber makanan juga dapat terpengaruh secara tidak langsung. Biomagnifikasi adalah proses di mana konsentrasi suatu zat meningkat di setiap tingkat trofik. Hal ini dapat menyebabkan konsentrasi logam berat yang lebih tinggi pada predator puncak. Biomagnifikasi ini dapat memiliki efek berjenjang pada seluruh jaring makanan, yang berdampak pada populasi ikan dan organisme lain di dalam ekosistem muara.

Sebagai kesimpulan, studi kasus yang meneliti respons spesifik spesies terhadap kontaminasi logam berat di muara sangat penting untuk memahami konsekuensi ekologis dari pencemaran pada populasi ikan. Spesies ikan yang berbeda menunjukkan kepekaan dan toleransi yang berbeda-beda terhadap logam berat, yang dapat menghasilkan respons biologis yang beragam. Beberapa spesies dapat menunjukkan resistensi dan berkembang di lingkungan yang terkontaminasi logam, sementara spesies lainnya mungkin mengalami penurunan tingkat pertumbuhan, gangguan reproduksi, atau peningkatan kematian. Dengan memahami respons spesifik spesies ini, para ilmuwan dapat memprediksi pergeseran dalam komposisi komunitas dan mengidentifikasi potensi pemenang dan pihak yang kalah dalam menghadapi polusi logam berat. Pengetahuan ini sangat penting untuk mengembangkan strategi konservasi dan pengelolaan yang efektif untuk melindungi ekosistem estuaria dari dampak buruk polusi.

Selain itu, studi kasus dapat menjelaskan mekanisme yang mendasari respons spesifik spesies. Sebagai contoh, ketika mempelajari efek stres logam berat pada spesies ikan, para peneliti menemukan bahwa beberapa spesies memiliki tingkat ekspresi gen detoksifikasi logam yang lebih tinggi. Keuntungan genetik ini memungkinkan mereka untuk mengatasi kontaminasi logam berat di lingkungan mereka dengan lebih baik. Dengan memahami mekanisme ini, para ilmuwan dapat



memperoleh wawasan tentang adaptasi spesifik yang dikembangkan oleh spesies ikan tertentu untuk bertahan hidup di muara yang tercemar.

Selain itu, studi kasus menunjukkan bahwa kontaminasi logam berat dapat mengubah perilaku dan preferensi makan spesies ikan. Perubahan ini dapat berdampak pada interaksi trofik dan dinamika jaring-jaring makanan di dalam ekosistem. Sebagai contoh, ikan dapat menghindari area tertentu atau mengubah kebiasaan makan mereka untuk meminimalkan paparan logam berat. Perilaku ini dapat mengganggu keseimbangan alami dari hubungan mangsa-pemangsa dan berdampak pada keseluruhan struktur dan fungsi ekosistem.

Dengan menjelaskan mekanisme ini, para peneliti dapat mengembangkan pemahaman yang lebih baik tentang konsekuensi ekologis dari kontaminasi logam berat di muara sungai. Pengetahuan ini kemudian dapat digunakan untuk menyusun strategi konservasi dan manajemen yang ditargetkan untuk melindungi spesies yang rentan. Misalnya, jika spesies ikan tertentu rentan terhadap logam berat, upaya konservasi dapat difokuskan untuk meminimalkan polusi di habitat mereka dan menerapkan langkah-langkah untuk meningkatkan kemampuan detoksifikasi alami mereka.

Selain itu, studi kasus dapat memberikan wawasan yang berharga tentang efek jangka panjang dari kontaminasi logam berat pada ekosistem. Dengan memantau populasi ikan dari waktu ke waktu, para peneliti dapat melacak komposisi spesies, kelimpahan, dan perubahan keberhasilan reproduksi. Informasi ini sangat penting untuk menentukan kesehatan dan ketahanan ekosistem estuaria secara keseluruhan dalam menghadapi polusi yang sedang berlangsung.

Kesimpulannya, studi kasus sangat penting dalam memajukan pemahaman kita tentang konsekuensi ekologis dari kontaminasi logam berat di muara. Studi kasus memberikan wawasan tentang respons spesifik spesies, mekanisme yang mendasari adaptasi, dan dampak yang lebih luas terhadap dinamika rantai makanan. Dengan pengetahuan ini, para ilmuwan dapat mengembangkan strategi konservasi dan manajemen yang ditargetkan untuk melindungi spesies yang rentan dan memastikan kesehatan jangka panjang ekosistem muara.

## 5.2. Pola Spasial dan Temporal Bioakumulasi Logam Berat

Pola spasial dan temporal bioakumulasi logam berat pada ikan muara berperan penting dalam memberikan informasi penting mengenai distribusi dan dinamika kontaminasi di dalam ekosistem ini. Estuari adalah lingkungan yang unik di mana air tawar dan air asin bertemu, menjadikannya sangat produktif dan penting secara ekologis. Namun, mereka juga rentan terhadap polusi, termasuk logam berat, yang mungkin membahayakan kesehatan ekosistem dan populasi manusia.

Studi kasus yang berfokus pada bioakumulasi logam berat pada ikan muara di berbagai habitat dan zona muara sangat penting untuk mengidentifikasi titik-titik pencemaran dan menilai sejauh mana penyebaran logam berat. Dengan memeriksa konsentrasi logam berat dalam jaringan ikan, para peneliti dapat memperoleh wawasan tentang akumulasi kontaminan dari waktu ke waktu. Informasi ini membantu kita memahami sumber, jalur, dan nasib logam berat di dalam ekosistem muara.

Berbagai faktor dapat memengaruhi pola spasial bioakumulasi logam berat pada ikan estuaria. Daerah-daerah tertentu dapat menunjukkan konsentrasi logam berat yang lebih tinggi karena sumber polusi lokal, seperti buangan industri atau limpasan perkotaan. Karakteristik sedimen, seperti komposisi dan ukuran butiran, juga dapat memengaruhi ketersediaan hayati ikan dan akumulasi logam berat. Selain itu, proses hidrodinamika, seperti arus pasang surut dan pola sirkulasi air, dapat memengaruhi pengangkutan dan pengendapan logam berat di dalam muara.

Memahami pola spasial ini sangat penting untuk memprioritaskan area untuk upaya restorasi dan pengelolaan. Dengan mengidentifikasi titik-titik polusi dan area dengan konsentrasi logam berat yang lebih tinggi, pihak berwenang dapat memfokuskan sumber daya mereka untuk menerapkan strategi remediasi yang ditargetkan. Upaya restorasi dapat mencakup pengurangan sumber polusi, penerapan praktik manajemen terbaik, dan pemulihan habitat yang terdegradasi. Selain itu, upaya pengelolaan dapat melibatkan pemantauan dan pengaturan kegiatan yang berkontribusi terhadap kontaminasi logam berat, seperti pembuangan limbah industri dan operasi pengerukan.

Kesimpulannya, pola spasial dan temporal bioakumulasi logam berat pada ikan estuaria memberikan informasi penting tentang distribusi dan dinamika kontaminasi dalam ekosistem ini. Studi kasus yang meneliti bioakumulasi logam berat di berbagai habitat dan zona estuaria membantu mengidentifikasi titik-titik pencemaran dan menilai tingkat penyebaran logam berat. Memahami pola spasial ini sangat penting untuk memprioritaskan area untuk upaya restorasi dan pengelolaan, yang pada akhirnya berkontribusi dalam melindungi dan melestarikan ekosistem estuaria serta kesejahteraan organisme dan masyarakat yang bergantung padanya.

Pola temporal bioakumulasi logam berat dapat memberikan wawasan yang berharga tentang dampak perubahan kondisi lingkungan dan aktivitas antropogenik dari waktu ke waktu. Studi pemantauan jangka panjang sangat penting dalam melacak tren tingkat logam berat, sehingga memungkinkan para ilmuwan untuk mengidentifikasi peningkatan atau penurunan kesehatan estuaria. Dengan menganalisis data temporal, para peneliti dapat mengungkap variasi musiman dalam kontaminasi logam berat, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu, salinitas, dan masukan air tawar. Dengan memahami pola-pola ini, kita dapat memahami secara komprehensif dinamika distribusi dan akumulasi logam berat di muara sungai, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai potensi dampak perubahan lingkungan di masa depan.

Akumulasi logam berat di muara menjadi perhatian besar karena toksisitas dan persistensinya di lingkungan. Logam-logam ini dapat masuk ke dalam ekosistem muara melalui berbagai jalur, termasuk buangan industri, limpasan pertanian, dan pengendapan di atmosfer. Setelah masuk, organisme dapat mengambilnya dan membiakkannya dalam rantai makanan, sehingga menimbulkan risiko bagi kehidupan akuatik dan kesehatan manusia. Bioakumulasi logam berat dapat menimbulkan konsekuensi yang luas, yang berdampak pada integritas ekologi muara secara keseluruhan.

Melalui studi pemantauan jangka panjang, para ilmuwan dapat mengumpulkan data tentang konsentrasi logam berat dalam jangka waktu yang lama. Studi ini memungkinkan mereka untuk mendeteksi tren temporal dan mengevaluasi efektivitas langkah-langkah pengendalian

polusi dari waktu ke waktu. Sebagai contoh, jika konsentrasi logam berat menurun secara stabil selama beberapa tahun, hal ini menunjukkan bahwa upaya mitigasi telah berhasil mengurangi masukan polutan. Sebaliknya, peningkatan kadar logam berat yang terus menerus dapat mengindikasikan kegagalan dalam strategi pengelolaan polusi atau munculnya sumber polusi baru.

Selain itu, data temporal dapat mengungkapkan variasi musiman dalam kontaminasi logam berat. Muara adalah lingkungan yang dinamis yang dapat mengalami perubahan musiman dalam hal suhu, salinitas, dan masukan air tawar. Variabel-variabel ini dapat mempengaruhi mobilitas dan perilaku logam berat, sehingga mempengaruhi pola distribusi dan akumulasinya. Sebagai contoh, konsentrasi logam berat dapat menjadi lebih tinggi selama peningkatan debit air tawar, karena sungai dapat mengangkut polutan dari sumber hulu ke muara. Demikian pula, suhu yang lebih hangat dapat mempercepat reaksi kimia dan meningkatkan ketersediaan hayati logam berat, yang mengarah ke tingkat akumulasi yang lebih tinggi.

Dengan memahami pola-pola temporal ini, para peneliti dapat membuat prediksi yang tepat mengenai dampak potensial dari perubahan lingkungan di masa depan terhadap dinamika logam berat di muara sungai. Perubahan iklim, misalnya, diperkirakan akan membawa perubahan pada pola suhu dan curah hujan, yang dapat mengubah siklus hidrologi muara sungai. Perubahan ini mungkin memiliki implikasi yang besar terhadap distribusi dan akumulasi logam berat. Dengan mempelajari data historis dan menganalisis tren temporal, para ilmuwan dapat menilai bagaimana muara sungai dapat merespons perubahan ini dan mengantisipasi potensi risiko ekologis.

Kesimpulannya, pola temporal bioakumulasi logam berat di muara memberikan wawasan yang berharga tentang dampak perubahan kondisi lingkungan dan aktivitas antropogenik. Studi pemantauan jangka panjang memungkinkan untuk melacak tren tingkat logam berat, menyoroti peningkatan atau penurunan kesehatan muara. Variasi musiman dalam kontaminasi logam berat dapat diidentifikasi melalui analisis data temporal, yang mengungkapkan pengaruh suhu, salinitas, dan masukan air tawar. Dengan memahami pola-pola ini, para peneliti dapat membuat

prediksi yang tepat mengenai efek potensial dari perubahan lingkungan di masa depan terhadap dinamika logam berat di muara. Pengetahuan ini sangat penting untuk upaya pengelolaan dan konservasi yang efektif, yang pada akhirnya akan menjaga kesehatan dan integritas ekosistem muara.

### 5.3. Pemantauan Jangka Panjang dan Analisis Kecenderungan

Pemantauan jangka panjang dan analisis pola kecenderungan memainkan peran penting dalam mempelajari kontaminasi logam berat di muara sungai dan mengevaluasi langkah-langkah mitigasi. Dengan terus memantau dalam jangka waktu yang lama, para peneliti dapat mengumpulkan data yang berharga mengenai persistensi atau pengurangan konsentrasi logam berat dalam air, sedimen, dan jaringan ikan. Kumpulan data ini sangat penting dalam mendeteksi tren dan perubahan tingkat polusi, yang memungkinkan para ilmuwan untuk membedakan antara fluktuasi jangka pendek dan tren jangka panjang. Informasi ini sangat penting untuk memahami lintasan kontaminasi logam berat di muara dan menilai efektivitas berbagai strategi mitigasi. Dengan memantau konsentrasi logam berat dari waktu ke waktu, para peneliti dapat mengidentifikasi pola dan variasi tingkat kontaminasi, sehingga mereka dapat mengambil keputusan yang tepat dalam menerapkan langkah-langkah mitigasi.

Selain itu, pemantauan jangka panjang memberikan wawasan tentang efek jangka panjang dari kontaminasi logam berat dan membantu menentukan keberhasilan upaya remediasi. Dengan menganalisis pola kecenderungan, para peneliti dapat mengidentifikasi area-area di mana kontaminasi meningkat atau menurun sehingga dapat memprioritaskan sumber daya dan intervensi yang sesuai. Secara keseluruhan, pemantauan jangka panjang dan analisis pola kecenderungan adalah alat yang sangat diperlukan dalam penelitian estuaria, yang memungkinkan para ilmuwan untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif tentang kontaminasi logam berat dan dampaknya serta mengembangkan strategi yang efektif untuk pengelolaan dan mitigasi.

Studi kasus yang melibatkan pemantauan jangka panjang memainkan peran penting dalam mengevaluasi efektivitas tindakan

manajemen untuk mengurangi masukan logam berat ke dalam sistem estuaria. Dengan terus memantau tingkat logam berat selama periode yang lama, para peneliti dapat menilai keberhasilan atau kegagalan berbagai tindakan peraturan atau program pengendalian polusi yang diterapkan untuk mengurangi input ini. Studi kasus ini memberikan wawasan yang berharga tentang dampak tindakan pengelolaan terhadap ekosistem estuaria dan membantu para pembuat kebijakan membuat keputusan yang tepat untuk mencapai hasil konservasi yang lebih efektif.

Melalui pemantauan jangka panjang, para ilmuwan dapat melacak perubahan tingkat logam berat dari waktu ke waktu, sehingga mereka dapat mengidentifikasi kecenderungan dan pola. Dengan membandingkan data yang dikumpulkan sebelum dan sesudah penerapan tindakan manajemen, para peneliti dapat menentukan dampak dari tindakan ini dalam mengurangi masukan logam berat. Informasi ini sangat penting bagi para pembuat kebijakan karena memberikan bukti objektif tentang keefektifan strategi mereka.

Mengevaluasi tindakan manajemen berdasarkan pemantauan jangka panjang juga membantu mengidentifikasi potensi kekurangan atau keterbatasan dalam pendekatan yang ada. Jika hasil studi kasus menunjukkan bahwa tindakan yang diterapkan tidak mencapai hasil yang diinginkan, pembuat kebijakan dapat menggunakan umpan balik ini untuk memodifikasi strategi mereka dan meningkatkan upaya konservasi mereka. Dengan memahami kekurangan dari pendekatan sebelumnya, pembuat kebijakan dapat mengembangkan intervensi yang lebih tepat sasaran dan efektif untuk mengurangi input logam berat ke dalam sistem estuaria.

Selain itu, studi kasus pemantauan jangka panjang berkontribusi dalam memahami dinamika kompleks antara aktivitas manusia, input logam berat, dan ekosistem muara. Dengan mendokumentasikan tren dan perubahan jangka panjang, para peneliti dapat mengidentifikasi pendorong penting dari input logam berat dan dampaknya terhadap ekosistem. Pengetahuan ini sangat penting untuk mengembangkan rencana pengelolaan yang komprehensif dengan mempertimbangkan aspek ekologi, sosial, dan ekonomi dari sistem estuaria.

Sebagai kesimpulan, studi kasus pemantauan jangka panjang memberikan informasi yang berharga untuk mengevaluasi keberhasilan atau kegagalan tindakan manajemen untuk mengurangi masukan logam berat ke dalam sistem estuaria. Studi-studi ini memberikan umpan balik yang sangat penting bagi para pembuat kebijakan dan memandu modifikasi strategi pengelolaan untuk mencapai hasil konservasi yang lebih efektif. Dengan terus memantau tingkat logam berat dari waktu ke waktu, para ilmuwan dapat menilai dampak dari tindakan peraturan atau program pengendalian polusi dan mengidentifikasi peluang untuk perbaikan. Pada akhirnya, pemantauan jangka panjang berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang dinamika kompleks dalam ekosistem estuaria dan mendukung pengembangan rencana pengelolaan yang komprehensif dan berkelanjutan.

Selain itu, pemantauan jangka panjang sangat penting dalam mengidentifikasi masalah yang muncul dan kontaminan dalam ekosistem estuaria, memastikan bahwa praktik *biomonitoring* tetap terkini dan relevan. Karena aktivitas manusia terus berdampak pada lingkungan, kontaminan baru terus masuk ke dalam muara, sehingga menimbulkan risiko potensial terhadap keseimbangan ekosistem yang rapuh. Kontaminan yang muncul ini mungkin berbeda dalam komposisi dan perilaku kimianya dari polutan tradisional seperti logam berat, sehingga memerlukan upaya pemantauan berkelanjutan untuk memahami efek jangka panjang dan potensi implikasinya terhadap kelestarian estuaria.

Dengan memasukkan analisis tren ke dalam program pemantauan jangka panjang, para peneliti dapat secara proaktif mengatasi tantangan yang muncul dan menjaga integritas ekologi muara dalam menghadapi ancaman yang terus berkembang. Analisis kecenderungan melibatkan pemeriksaan data yang dikumpulkan dalam jangka waktu yang lama untuk mengidentifikasi pola, perubahan, dan korelasi potensial. Pendekatan ini memungkinkan para ilmuwan untuk mendeteksi pergeseran tingkat kontaminan, indikator kesehatan ekosistem, dan parameter penting lainnya yang mungkin menandakan masalah yang muncul.

Misalnya, melalui pemantauan jangka panjang, para peneliti dapat mengidentifikasi peningkatan konsentrasi kontaminan baru secara tiba-

tiba, yang dapat mengindikasikan potensi kejadian pencemaran sumber titik atau masalah yang muncul. Dengan segera menyelidiki anomali semacam itu, para ilmuwan dapat mengambil tindakan yang diperlukan untuk mengurangi dampaknya terhadap ekosistem muara dan mencegah kontaminasi lebih lanjut. Selain itu, pemantauan jangka panjang memungkinkan pelacakan kecenderungan kontaminan dari waktu ke waktu, memberikan wawasan yang berharga tentang efektivitas langkah-langkah pengendalian polusi, keberhasilan upaya restorasi, dan kesehatan lingkungan muara secara keseluruhan.

Selain itu, pemantauan jangka panjang memungkinkan para ilmuwan untuk menilai efek kumulatif dari berbagai kontaminan pada ekosistem estuaria. Meskipun masing-masing kontaminan mungkin memiliki sifat toksikologi yang diketahui, dampak gabungannya bisa sangat kompleks dan tidak dapat diprediksi. Dengan memantau keberadaan dan tingkat berbagai kontaminan selama periode yang lama, para peneliti dapat lebih memahami interaksi, efek sinergis, dan potensi risiko terhadap ekosistem secara keseluruhan. Pengetahuan ini sangat penting untuk mengembangkan strategi pengelolaan yang efektif dan membuat keputusan yang tepat untuk melindungi muara sungai dan beragam spesies yang bergantung padanya.

Kesimpulannya, pemantauan jangka panjang sangat penting untuk mengidentifikasi masalah yang muncul dan kontaminan dalam ekosistem estuaria. Dengan menggunakan analisis tren dan terus mengumpulkan data dalam jangka waktu yang lama, para peneliti dapat secara proaktif mengatasi tantangan yang muncul, melindungi lingkungan muara dari ancaman yang terus berkembang, dan memastikan integritas ekologis jangka panjang dari habitat yang berharga ini. Melalui pemantauan yang berkelanjutan, kita dapat lebih memahami dampak kontaminan yang muncul, melacak perubahan kesehatan ekosistem, dan membuat keputusan yang tepat untuk menjaga keseimbangan muara bagi generasi mendatang.

Sebagai kesimpulan, studi kasus tentang bioindikator yang sedang berjalan sangat diperlukan untuk mengungkap kompleksitas kontaminasi logam berat di muara sungai. Sebagai ekosistem transisi di mana air tawar bertemu dengan laut, muara sangat rentan terhadap pencemaran dari



berbagai sumber, termasuk kegiatan industri, limpasan pertanian, dan pembangunan perkotaan. Logam berat di lingkungan muara ini menimbulkan ancaman yang signifikan terhadap kesehatan organisme air dan manusia yang bergantung pada ekosistem ini untuk berbagai tujuan, seperti memancing, rekreasi, dan pariwisata.

Para peneliti dapat memperoleh wawasan yang berharga mengenai dampak ekologis dari kontaminasi logam berat dengan mempelajari bioindikator, seperti spesies ikan, moluska, dan tanaman tertentu. Spesies yang berbeda merespons polusi secara berbeda, dan mempelajari respons spesifik mereka dapat memberikan informasi penting tentang tingkat dan tingkat keparahan kontaminasi. Sebagai contoh, spesies ikan tertentu dapat menunjukkan perubahan fisiologis atau perilaku dengan adanya logam berat, sementara spesies tanaman tertentu dapat menunjukkan tanda-tanda berkurangnya pertumbuhan atau pola reproduksi yang berubah. Respons spesifik spesies ini membantu para peneliti memahami kesehatan ekologi muara secara keseluruhan dan potensi risiko yang ditimbulkan terhadap penghuninya.

Selain respons spesifik spesies, studi kasus tentang bioindikator juga memberikan wawasan tentang pola spasial dan temporal bioakumulasi logam berat. Bioakumulasi mengacu pada proses di mana logam berat terakumulasi dalam jaringan organisme dari waktu ke waktu. Dengan menganalisis distribusi dan dinamika bioakumulasi, para peneliti dapat mengidentifikasi titik-titik kontaminasi, menentukan sumber dan jalur logam berat, dan menilai dampak jangka panjang terhadap ekosistem. Informasi ini sangat penting untuk merancang strategi pengelolaan yang efektif dan memprioritaskan upaya konservasi di muara sungai.

Pemantauan jangka panjang dan analisis kecenderungan sangat penting untuk memahami kontaminasi logam berat di muara. Dengan secara konsisten memantau tingkat logam berat dalam bioindikator selama periode yang lama, para peneliti dapat melacak perubahan tingkat kontaminasi, mengidentifikasi masalah yang muncul, dan mengevaluasi efektivitas upaya pengelolaan. Perspektif jangka panjang ini sangat penting untuk mendeteksi kecenderungan dan pola yang tidak ada dalam studi jangka pendek. Perspektif jangka panjang juga memungkinkan para

95 peneliti untuk menilai keberhasilan tindakan konservasi dan remediasi serta membuat keputusan yang tepat untuk masa depan.

Melalui studi kasus yang ketat, para peneliti dapat memahami secara komprehensif dinamika logam berat di muara. Studi-studi ini memberikan data dan bukti berharga yang dapat mendorong strategi konservasi dan manajemen berbasis bukti. Dengan mengungkap kompleksitas kontaminasi logam berat, para peneliti dapat mengadvokasi kebijakan dan praktik yang memprioritaskan pelestarian dan pemulihan ekosistem muara. Pada akhirnya, tujuannya adalah untuk memastikan kesehatan ekologis dari ekosistem vital ini untuk generasi sekarang dan masa depan sambil menjaga kesejahteraan masyarakat yang bergantung padanya. Dengan pengetahuan yang diperoleh dari studi kasus tentang bioindikator, kita dapat bekerja menuju masa depan yang berkelanjutan di mana muara sungai berkembang dan menyediakan layanan ekologi yang tak ternilai.

## BAB 6

### Risiko Ekologi dan Implikasi Kesehatan Manusia

---

#### 6.1. Pendekatan Penilaian Risiko Ekologis

Penilaian risiko ekologis memainkan peran penting dalam memahami potensi konsekuensi kontaminasi logam berat pada ekosistem estuaria. Penilaian ini mencakup evaluasi sistematis tentang bagaimana organisme terpapar polutan, kerentanannya terhadap efek yang merugikan, dan kemungkinan implikasinya terhadap struktur dan fungsi ekosistem. Berbagai pendekatan tersedia untuk menilai risiko ekologi, dari yang bersifat kualitatif hingga kuantitatif. Salah satu pendekatan tersebut adalah pendekatan Bobot Bukti (*Weight of Evidence/WoE*), yang mengintegrasikan berbagai bukti untuk memahami risiko yang ditimbulkan oleh logam berat di muara sungai secara komprehensif.

Pendekatan Bobot Bukti mempertimbangkan berbagai sumber informasi untuk memberikan penilaian yang kuat terhadap risiko ekologis. Pendekatan ini menggabungkan data dari studi toksisitas laboratorium, *biomonitoring* lapangan, dan pemodelan yang lebih baik untuk memahami potensi dampak kontaminasi logam berat. Studi toksisitas laboratorium melibatkan paparan organisme pada berbagai konsentrasi logam berat dalam kondisi yang terkendali untuk menentukan dampaknya terhadap pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidup. *Biomonitoring* lapangan melibatkan studi tentang organisme di habitat alami mereka untuk menilai kesehatan dan kelimpahan mereka terkait kontaminasi logam berat. Pemodelan menggunakan teknik matematika dan statistik untuk mensimulasikan sifat dan nasib logam berat di lingkungan, memberikan wawasan tentang potensi distribusi dan dampaknya.

Dengan mengintegrasikan berbagai bukti yang berbeda ini, pendekatan WoE meningkatkan akurasi dan keandalan penilaian risiko ekologis. Pendekatan ini membantu mengatasi keterbatasan sumber data individual dan memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang potensi risiko kontaminasi logam berat. Sebagai contoh, studi toksisitas di

laboratorium dapat memberikan informasi yang berharga tentang efek logam berat yang lebih luas pada spesies tertentu, tetapi studi tersebut mungkin perlu untuk sepenuhnya menangkap kompleksitas dan interaksi di dalam ekosistem. Di sisi lain, *biomonitoring* lapangan memungkinkan penilaian yang lebih realistis terhadap kondisi dan efek aktual di lingkungan estuaria. Pemodelan membantu menjembatani kesenjangan antara data laboratorium dan lapangan dengan menyediakan kerangka kerja prediktif untuk memahami karakteristik dan distribusi logam berat di muara.

Pendekatan WoE juga memungkinkan untuk mempertimbangkan ketidakpastian dan variabilitas dalam data. Pendekatan ini mengakui bahwa tidak ada satu pun bukti yang dapat memberikan jawaban yang pasti dan bahwa sumber informasi yang berbeda mungkin memiliki tingkat keandalan dan relevansi yang berbeda. Pendekatan WoE memberikan penilaian risiko ekologi yang lebih seimbang dan kuat dengan menimbang dan mengintegrasikan berbagai sumber yang berbeda ini. Pendekatan ini membantu para pengambil keputusan dan pemangku kepentingan untuk memahami potensi dampak kontaminasi logam berat terhadap ekosistem muara dan dalam merumuskan strategi pengelolaan dan mitigasi yang tepat.

Kesimpulannya, penilaian risiko ekologis sangat penting untuk mengevaluasi dampak potensial kontaminasi logam berat terhadap ekosistem muara. Pendekatan Bobot Bukti, yang mengintegrasikan berbagai bukti, menawarkan pemahaman yang komprehensif tentang risiko yang ditimbulkan oleh logam berat di muara sungai. Dengan mempertimbangkan data dari studi toksisitas laboratorium, *biomonitoring* lapangan, dan pemodelan, pendekatan WoE meningkatkan akurasi dan keandalan penilaian risiko ekologis. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih menyeluruh terhadap konsekuensi potensial terhadap struktur dan fungsi ekosistem, sehingga membantu pengambilan keputusan dan pengelolaan lingkungan estuaria yang efektif.

Selain itu, teknik penilaian risiko probabilistik sangat penting dalam mengevaluasi dan memahami risiko ekologis. Teknik-teknik ini memungkinkan kuantifikasi ketidakpastian, memberikan pemahaman

yang lebih menyeluruh tentang dampak potensial terhadap ekosistem. Salah satu pendekatan tersebut adalah simulasi Monte Carlo, yang melibatkan menjalankan berbagai iterasi model menggunakan nilai input yang dihasilkan secara acak dalam rentang tertentu. Pendekatan ini memungkinkan para peneliti untuk mengeksplorasi berbagai hasil yang mungkin terjadi dan menilai kemungkinan skenario risiko yang berbeda. Analisis sensitivitas adalah sarana berharga lainnya yang membantu mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang mendorong risiko ekologi. Para peneliti dapat mengidentifikasi variabel mana yang secara signifikan memengaruhi hasil dengan memvariasikan parameter input secara sistematis dan mengamati perubahan yang dihasilkan dalam estimasi risiko. Di sisi lain, pendekatan Bayesian menyediakan kerangka kerja untuk menggabungkan pengetahuan sebelumnya dan memperbaruinya dengan bukti-bukti baru. Proses berulang ini memungkinkan penyempurnaan estimasi risiko seiring dengan tersedianya data baru. Dengan menggunakan teknik penilaian risiko probabilistik ini, para peneliti dapat memperhitungkan variabilitas yang melekat pada kondisi lingkungan dan respons biologis, yang mengarah pada estimasi risiko yang lebih kuat dan dapat dipertahankan. Teknik ini, pada gilirannya, memungkinkan untuk memprioritaskan risiko, identifikasi habitat dan spesies muara yang paling rentan, dan perumusan strategi pengelolaan yang ditargetkan. Pada akhirnya, pendekatan ini membantu melindungi integritas ekologis ekosistem kritis dengan memandu pengambilan keputusan yang tepat dan memfasilitasi upaya konservasi yang proaktif.

## 6.2. Transfer Trofik Logam Berat ke Tingkat Trofik yang Lebih Tinggi

Perpindahan trofik logam berat dalam jaring-jaring makanan di muara memainkan peran penting dalam memahami implikasi ekologis yang lebih luas dari kontaminasi. Muara, tempat pertemuan air tawar dan air laut, berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai organisme dan bertindak sebagai zona transisi antara ekosistem darat dan laut. Logam berat seperti timbal, kadmium, merkuri, dilepaskan ke dalam muara melalui aktivitas antropogenik seperti pembuangan industri, limpasan pertanian, dan urbanisasi. Setelah logam berat ini memasuki lingkungan estuaria, mereka mengalami bioakumulasi dalam produsen primer,

seperti ganggang dan tanaman, serta detritus. Ketika herbivora mengonsumsi produsen primer, logam berat dipindahkan ke tingkat trofik yang lebih tinggi. Proses ini terus berlanjut ketika predator memakan herbivora, yang mengakibatkan biomagnifikasi logam berat dalam rantai makanan. Biomagnifikasi merupakan fenomena yang mengkhawatirkan karena meningkatkan konsentrasi logam berat di setiap tingkat trofik yang berurutan.

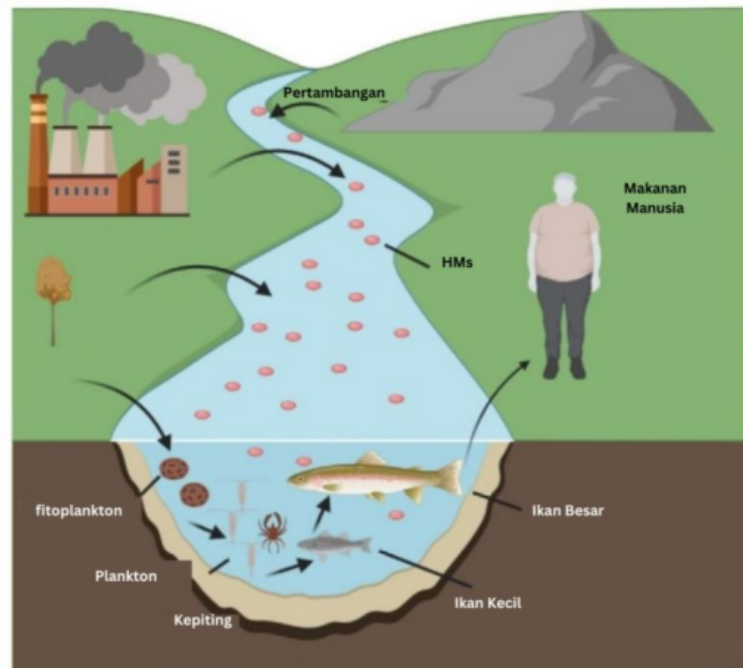
Akibatnya, predator teratas, termasuk ikan predator dan mamalia laut, menghadapi peningkatan paparan zat beracun ini. Kondisi ini menjadi perhatian khusus bagi manusia yang mengonsumsi makanan laut, karena mereka dapat secara tidak sengaja menelan logam berat dalam jumlah besar. Oleh karena itu, memahami perpindahan trofik logam berat dalam jaring makanan estuaria sangat penting untuk menilai dan memitigasi risiko ekologi dan kesehatan manusia yang terkait dengan kontaminasi dalam ekosistem yang rentan ini.

94 Studi kasus yang menyelidiki dinamika perpindahan trofik merupakan hal yang sangat penting dalam meningkatkan pemahaman kita tentang potensi risiko yang terkait dengan mangsa yang terkontaminasi logam berat untuk organisme tingkat trofik yang lebih tinggi. Studi-studi ini menjelaskan jalur rumit di mana logam berat dapat berpindah ke atas rantai makanan, yang pada akhirnya memengaruhi organisme di tingkat trofik yang lebih tinggi. Dengan meneliti perpindahan logam berat dari mangsa ke pemangsa, para peneliti dapat mengidentifikasi pola bioakumulasi dan biomagnifikasi yang terjadi di dalam ekosistem.

Selain itu, studi kasus ini menekankan pentingnya mempertimbangkan interaksi multi-spesies dan rantai trofik ketika melakukan penilaian risiko ekologis. Tidaklah cukup hanya berfokus pada dampak langsung logam berat terhadap organisme individual; sebaliknya, memeriksa konsekuensi ekologis yang lebih luas sangatlah penting. Sebagai contoh, jika pemangsa utama mengalami penurunan populasi akibat kontaminasi logam berat, hal ini dapat mengakibatkan melimpahnya spesies mangsa mereka. Akibatnya, keseimbangan yang terganggu dalam ekosistem muara dapat menyebabkan efek berjenjang di seluruh rantai makanan.

Mengintegrasikan data transfer trofik ke dalam penilaian risiko ekologis sangat penting untuk pemahaman yang lebih komprehensif tentang dampak logam berat pada jaring makanan estuaria. Dengan mempertimbangkan keterkaitan antara spesies yang berbeda dalam suatu ekosistem, kita dapat mengevaluasi potensi risiko dan konsekuensi kontaminasi logam berat dengan lebih baik. Integrasi ini memungkinkan pendekatan yang lebih holistik terhadap penilaian risiko ekologis, yang sangat penting untuk pengelolaan lingkungan yang efektif dan upaya konservasi.

Sebagai kesimpulan, studi kasus yang menyelidiki dinamika transfer trofik memberikan wawasan yang berharga tentang potensi risiko mangsa yang terkontaminasi logam berat terhadap organisme tingkat trofik yang lebih tinggi. Studi-studi tersebut menyoroti pentingnya mempertimbangkan interaksi multi-spesies dan kaskade trofik dalam penilaian risiko ekologis untuk memahami konsekuensi ekologis yang lebih luas dengan lebih baik. Dengan mengintegrasikan data transfer trofik, kita dapat memperoleh pandangan yang lebih holistik tentang dampak logam berat pada rantai makanan di muara sungai dan menekankan keterkaitan ekosistem ini. Pengetahuan ini sangat penting untuk membuat keputusan yang tepat terkait pengelolaan dan konservasi lingkungan, yang pada akhirnya memastikan kesehatan dan stabilitas ekosistem kita.



Gambar 8. Ketersediaan hayati logam berat (HM) dalam rantai makanan (Naija & Yalcin, 2023)

### 6.3. Risiko Kesehatan Manusia Berkaitan dengan Ikan yang Terkontaminasi Logam Berat

Selain konsekuensi ekologis, masalah kontaminasi logam berat pada ikan estuaria juga menimbulkan kekhawatiran terkait potensi risiko terhadap kesehatan manusia melalui konsumsi makanan laut. Spesies ikan estuaria memainkan peran penting dalam perikanan lokal, yang berfungsi sebagai komponen makanan utama bagi banyak populasi manusia dan menyediakan nutrisi penting. Namun, bioakumulasi logam berat pada ikan-ikan ini dapat menyebabkan manusia terpapar pada tingkat kontaminan yang beracun, sehingga menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan. Mengonsumsi ikan yang terkontaminasi dapat menyebabkan efek kesehatan yang merugikan, termasuk gangguan neurologis, disfungsi ginjal, dan gangguan perkembangan.



Logam berat beracun ini, seperti arsenik, merkuri, timbal, kadmium, dan, mer<sup>36</sup>upakan elemen alami yang dilepaskan ke lingkungan melalui berbagai kegiatan manusia, seperti pertambangan, proses industri, dan pembakaran bahan bakar fosil. Logam-logam ini dapat terakumulasi di sedimen dan perairan muara, di mana ikan menyerapnya melalui insang dan makanan mereka. Akibatnya, konsentrasi logam berat pada ikan muara bisa jauh lebih tinggi daripada di lingkungan laut lainnya.

Ketika manusia mengonsumsi ikan yang terkontaminasi logam berat, mereka berisiko menelan zat-zat beracun ini. Begitu masuk ke dalam tubuh, logam berat dapat membahayakan berbagai organ dan sistem. Misalnya, merkuri mempengaruhi sistem saraf, yang berpotensi menyebabkan gangguan neurologis seperti kehilangan koordinasi, gangguan memori, dan bahkan gangguan kognitif. Paparan timbal dapat menyebabkan gangguan perkembangan pada anak-anak, yang mempengaruhi kemampuan kognitif dan pertumbuhan mereka secara keseluruhan. Kadmium telah dikaitkan dengan disfungsi ginjal dan dapat menyebabkan kerusakan ginjal, sementara paparan arsenik telah dikaitkan dengan peningkatan risiko kanker tertentu dan penyakit kardiovaskular.

Risiko kesehatan yang merugikan tergantung pada konsentrasi dan jenis logam berat dalam ikan yang terkontaminasi serta frekuensi dan kuantitas konsumsi makanan laut. Populasi tertentu, seperti wanita hamil, bayi, dan anak-anak, secara khusus terancam oleh dampak buruk paparan logam berat karena tubuh mereka yang sedang berkembang dan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi.

Berbagai teknik dapat diterapkan untuk mengurangi potensi risiko yang terkait dengan kontaminasi logam berat pada ikan muara. Pemantauan dan pengujian populasi ikan secara teratur dapat membantu mengidentifikasi area dengan konsentrasi logam yang tinggi dan memberikan data yang berharga untuk pengelolaan perikanan. Kampanye kesadaran publik dan inisiatif pendidikan dapat menginformasikan individu tentang risiko paparan logam berat dan mempromosikan praktik konsumsi makanan laut yang bertanggung jawab.

Kesimpulannya, kontaminasi logam berat pada ikan muara memiliki konsekuensi ekologis dan menimbulkan risiko potensial bagi kesehatan

manusia melalui konsumsi makanan laut. Bioakumulasi logam berat pada ikan-ikan ini dapat menyebabkan kontaminan beracun pada manusia, yang mengakibatkan efek kesehatan yang merugikan mulai dari gangguan neurologis hingga disfungsi ginjal dan gangguan perkembangan. Dalam menjaga kesehatan manusia, sangat penting untuk menerapkan langkah-langkah seperti memantau populasi ikan, meningkatkan kesadaran, dan mempromosikan praktik konsumsi makanan laut yang bertanggung jawab.

Menilai risiko kesehatan manusia yang terkait dengan ikan yang terkontaminasi logam berat merupakan tugas yang kompleks yang membutuhkan pertimbangan yang cermat dari berbagai faktor. Salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan adalah tingkat konsumsi ikan, karena hal ini secara langsung mempengaruhi paparan logam berat. Setiap orang memiliki kebiasaan konsumsi yang berbeda; beberapa orang mungkin mengonsumsi ikan lebih sering daripada yang lain. Oleh karena itu, sangat penting untuk memperhitungkan variasi pola konsumsi ini ketika mengevaluasi potensi risiko kesehatan.

Selain itu, berat badan juga memainkan peran penting dalam menilai risiko kesehatan manusia. Logam berat terakumulasi di dalam tubuh dari waktu ke waktu, dan individu dengan berat badan yang lebih tinggi biasanya memiliki volume distribusi yang lebih besar untuk kontaminan ini. Hal ini berarti mereka memiliki kapasitas yang lebih tinggi untuk mengakumulasi dan menyimpan logam berat, yang berpotensi meningkatkan kerentanan mereka terhadap efek kesehatan yang merugikan. Oleh karena itu, ketika mengevaluasi risiko yang terkait dengan ikan yang terkontaminasi logam berat, penting untuk memperhitungkan bobot tubuh ikan.

Selain itu, konsentrasi logam berat dalam jaringan ikan merupakan faktor penting dalam menilai risiko kesehatan manusia. Spesies ikan yang berbeda memiliki kapasitas yang berbeda-beda dalam mengakumulasi logam berat; daerah tertentu mungkin lebih rentan terhadap kontaminasi dibandingkan daerah lainnya. Oleh karena itu, mengukur dan menganalisis konsentrasi logam dalam jaringan ikan diperlukan untuk menentukan potensi risiko terhadap kesehatan manusia.

Model-model probabilistik dapat digunakan untuk melakukan penilaian paparan dan mengevaluasi risiko secara akurat. Model-model ini mempertimbangkan variabilitas individu dalam kebiasaan konsumsi dan potensi perbedaan sensitivitas terhadap toksisitas logam berat. Para peneliti dapat menghasilkan penilaian risiko yang lebih realistis dan komprehensif dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini.

Selain itu, sangat penting untuk menghubungkan penilaian ekologi dan kesehatan manusia untuk memberikan pemahaman yang komprehensif kepada para pembuat kebijakan tentang risiko kontaminasi logam berat di muara. Penilaian risiko ekologi mengevaluasi dampak kontaminasi logam berat pada ekosistem, termasuk populasi ikan dan lingkungan. Dengan mengintegrasikan penilaian ini dengan penilaian risiko kesehatan manusia, para pembuat kebijakan dapat membuat keputusan yang tepat dalam mengelola dan memitigasi risiko yang terkait dengan ikan yang terkontaminasi logam berat.

Kesimpulannya, menilai risiko kesehatan manusia yang terkait dengan ikan yang terkontaminasi logam berat merupakan upaya yang memiliki banyak aspek. Para peneliti dapat melakukan penilaian paparan dengan menggunakan model probabilistik dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti tingkat konsumsi ikan, berat badan, dan konsentrasi logam dalam jaringan ikan. Menghubungkan penilaian risiko ekologi dengan penilaian kesehatan manusia memberikan pemahaman yang komprehensif kepada pemerintah tentang risiko yang terkait dengan kontaminasi logam berat di muara sungai. Pada akhirnya, pengetahuan ini dapat memandu strategi manajemen yang efektif dalam melindungi kesehatan manusia dan melestarikan integritas ekosistem perairan.

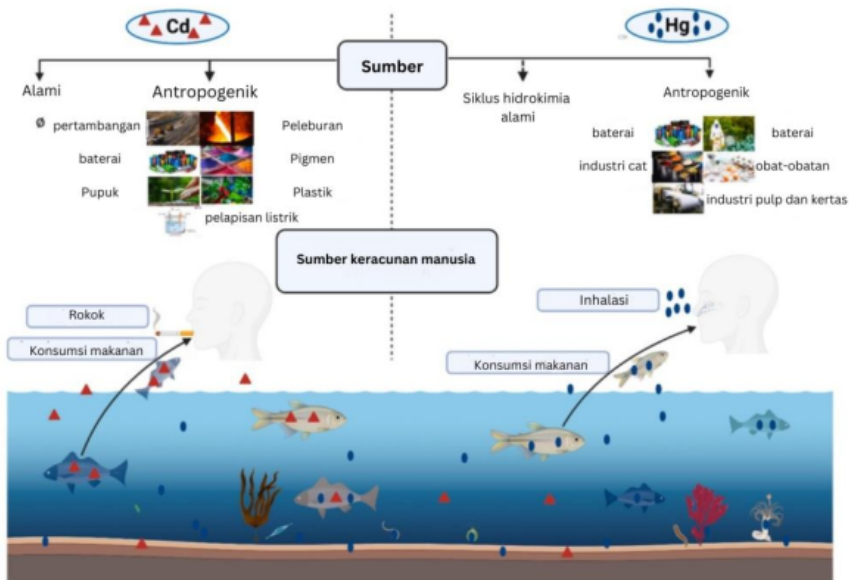
Kesimpulannya, menilai risiko ekologi dan implikasi kesehatan manusia sangat penting dalam memahami cakupan penuh dampak yang berasal dari kontaminasi logam berat di ekosistem muara. Dengan menggunakan pendekatan penilaian risiko ekologi, seperti metode probabilistik, para ilmuwan dapat mengevaluasi secara komprehensif risiko yang ditimbulkan terhadap berbagai spesies dan habitat di dalam ekosistem ini. Selain itu, studi transfer trofik menawarkan wawasan yang berharga tentang konsekuensi potensial pada jaring makanan estuaria, menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan interaksi multi spesies.

Studi-studi ini membantu menjelaskan bagaimana kontaminasi logam berat dapat menyebar melalui berbagai tingkat rantai makanan, mempengaruhi organisme di berbagai tingkat trofik.

Selain itu, mengevaluasi risiko kesehatan manusia sangat penting dalam menyoroti pentingnya ikan yang terkontaminasi logam berat sebagai vektor paparan bagi populasi manusia. Ekosistem estuaria sering kali berfungsi sebagai sumber makanan penting bagi masyarakat pesisir, dan mengonsumsi ikan yang terkontaminasi menimbulkan risiko langsung bagi kesehatan manusia. Logam berat dapat terakumulasi dalam jaringan ikan, yang pada akhirnya masuk ke dalam tubuh manusia yang bergantung pada ekosistem ini sebagai sumber makanan. Oleh karena itu, menilai dan memahami potensi implikasi kesehatan yang terkait dengan kontaminasi logam berat sangat penting untuk melindungi kesejahteraan masyarakat.

Para peneliti dapat memberikan informasi yang diperlukan untuk mengembangkan strategi pengelolaan dan konservasi berbasis bukti dengan melakukan penilaian yang ketat dan mengintegrasikan berbagai bukti. Strategi ini sangat penting untuk kesejahteraan masyarakat yang bergantung pada mereka dan melindungi ekosistem muara dan melindungi ekosistem muara dan melindungi ekosistem muara dan melindungi ekosistem muara. Melalui penilaian ini, para pembuat kebijakan dan pemangku kepentingan dapat membuat keputusan yang dipublikasikan untuk mengurangi risiko kontaminasi logam berat dan melindungi integritas ekologi ekosistem muara. Pada akhirnya, upaya untuk menilai risiko ekologi dan implikasi kesehatan manusia memberikan landasan bagi praktik manajemen berkelanjutan yang mempromosikan kesehatan jangka panjang ekosistem yang berharga ini dan masyarakat yang bergantung padanya.

Risiko kesehatan manusia yang terkait dengan ikan yang terkontaminasi logam berat dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Sumber-sumber utama produksi Cd dan Hg serta keracunan pada manusia yang menyebabkan kardiotoxsisitas dan neurotoksisitas (Naija & Yalcin, 2023).

## BAB 7

### Strategi Mitigasi dan Manajemen

---

#### 7.1. Kerangka Kerja Regulasi untuk Pengendalian Pencemaran Logam Berat

Menetapkan kerangka kerja peraturan yang kuat untuk pengendalian pencemaran logam berat sangat penting dalam melindungi ekosistem muara dan kesehatan manusia. Estuari, yang merupakan penghubung antara lingkungan air tawar dan laut, memiliki peran penting secara ekologis dan mendukung beragam spesies. Namun, estuari juga sangat rentan terhadap polusi, terutama dari logam berat. Logam-logam ini, yang antara lain meliputi arsenik, timbal, merkuri, dan kadmium, dapat memberikan dampak yang merugikan bagi organisme akuatik dan populasi manusia.

Pemerintah dan lembaga lingkungan hidup sangat penting dalam merumuskan dan menerapkan peraturan yang membatasi pembuangan logam berat ke muara. Kerangka kerja peraturan ini memastikan bahwa kegiatan industri mematuhi batas polusi yang aman dengan menetapkan standar limbah yang ketat untuk industri. Kerangka kerja peraturan ini melibatkan pemantauan dan pengendalian pelepasan logam berat dari proses industri dan mendorong adopsi teknologi yang lebih bersih. Selain itu, pembatasan penggunaan zat-zat tertentu yang mengandung logam berat, seperti cat berbasis timbal atau produk yang mengandung merkuri, dapat membantu mencegah masuknya zat-zat tersebut ke dalam muara.

Limpasan pertanian merupakan sumber pencemaran logam berat yang signifikan dalam ekosistem estuaria. Pupuk, pestisida, dan kotoran hewan dapat mengandung logam berat dalam kadar yang tinggi, yang dapat terbawa ke badan air selama hujan atau irigasi. Kerangka kerja peraturan dapat membatasi pupuk atau pestisida tertentu yang mengandung logam berat, mendorong praktik pertanian yang berkelanjutan, dan menerapkan sistem pengelolaan dan penahanan limbah yang tepat.

Kerangka kerja peraturan yang efektif sangat penting dalam meminimalkan sumber-sumber pencemaran logam berat yang berasal dari manusia dan membatasi masuknya bahan pencemar ke dalam lingkungan muara. Dengan demikian, kerangka kerja ini melindungi keseimbangan ekosistem estuaria yang rapuh, melestarikan keanekaragaman hayati dan fungsi ekologisnya. Kerangka kerja ini juga melindungi kesehatan manusia dengan mengurangi risiko yang terkait dengan paparan logam berat, seperti gangguan saraf, kerusakan ginjal, dan masalah perkembangan.

Selain itu, kerangka kerja peraturan yang kuat menangani sumber-sumber pencemaran logam berat saat ini dan mengantisipasi serta merespons ancaman yang muncul. Ketika industri, teknologi, dan zat-zat baru diperkenalkan, pemerintah dan badan-badan lingkungan hidup harus beradaptasi dan memperbarui peraturan-peraturan yang ada. Situasi ini membutuhkan pemantauan, penelitian, dan kolaborasi yang berkelanjutan antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk para ilmuwan, pembuat kebijakan, perwakilan industri, dan advokat lingkungan.

Kesimpulannya, membangun kerangka kerja peraturan yang kuat untuk pengendalian pencemaran logam berat merupakan hal yang mendasar dalam menjaga ekosistem muara dan kesehatan manusia. Dengan merumuskan dan menerapkan peraturan yang membatasi pembuangan logam berat ke muara, pemerintah, dan lembaga lingkungan hidup memainkan peran penting dalam meminimalkan sumber pencemaran antropogenik. Kerangka kerja peraturan ini memastikan kepatuhan industri, membatasi penggunaan zat-zat tertentu, dan memberlakukan batasan limpasan pertanian. Dengan demikian, mereka melindungi lingkungan muara, melestarikan keanekaragaman hayati, dan mengurangi risiko yang terkait dengan paparan logam berat bagi organisme akuatik dan populasi manusia.

Selain itu, kerangka kerja peraturan harus mencakup pendekatan multidisiplin, dengan mempertimbangkan interaksi yang kompleks antara logam berat dan sistem ekologi. Keberadaan logam berat dalam ekosistem dapat menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan, satwa liar, dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, sangat penting untuk

melibatkan berbagai disiplin ilmu, seperti ahli ekologi, ahli toksikologi, ahli kimia, dan pembuat kebijakan, dalam mengembangkan peraturan untuk mengatasi masalah ini secara komprehensif. Setiap disiplin ilmu membawa perspektif dan keahlian yang unik untuk memahami hubungan yang rumit antara logam berat dan sistem ekologi.

Upaya kolaboratif antara bidang-bidang ini sangat penting untuk merancang peraturan yang sehat secara ilmiah dan layak. Ahli ekologi dapat memberikan wawasan tentang dampak ekologis dari logam berat dengan mempelajari pengaruhnya terhadap berbagai organisme, populasi, dan ekosistem. Ahli toksikologi dapat menyumbangkan pengetahuan mereka tentang toksisitas dan bioakumulasi logam berat, menilai risiko yang ditimbulkannya terhadap berbagai organisme dan lingkungan. Ahli kimia sangat penting dalam mengidentifikasi dan mengkuantifikasi logam berat dalam berbagai matriks lingkungan, memastikan pengukuran dan analisis yang akurat. Para pemangku kebijakan bertanggung jawab untuk menerjemahkan temuan-<sup>19</sup> temuan ilmiah ke dalam peraturan yang dapat ditindaklanjuti, dengan mempertimbangkan faktor-faktor sosial, ekonomi, dan politik.

Pemantauan yang konstan dan tinjauan berkala terhadap peraturan-peraturan ini diperlukan untuk beradaptasi dengan tantangan-tantangan yang muncul dan temuan-temuan ilmiah yang baru. Penelitian logam berat terus berkembang, dengan kemajuan dalam teknik analisis, studi toksisitas, dan pemantauan lingkungan. Oleh karena itu, peraturan-peraturan harus dinamis dan fleksibel untuk memasukkan pengetahuan ilmiah terbaru dan secara efektif mengatasi masalah-masalah yang muncul. Peninjauan secara berkala memungkinkan dilakukannya penyesuaian dan penyempurnaan, untuk memastikan bahwa peraturan-peraturan tersebut tetap mutakhir dan relevan dalam menghadapi masalah lingkungan yang terus berkembang.

Dengan mematuhi standar peraturan yang ketat, masyarakat dapat memastikan perlindungan dan konservasi ekosistem muara untuk generasi mendatang. Estuari adalah ekosistem yang sangat produktif dan bernilai ekologis yang berfungsi sebagai habitat penting bagi banyak spesies. Namun, ekosistem ini sering kali rentan terhadap pencemaran logam berat karena kedekatannya dengan kawasan industri, pertanian,



dan perkotaan. Menerapkan peraturan yang komprehensif dan terinformasi dengan baik dapat membantu meminimalkan pelepasan dan akumulasi logam berat di muara sungai, menjaga integritas ekologi dan organisme yang bergantung padanya. Melalui regulasi yang bertanggung jawab, kita dapat mengurangi dampak buruk logam berat, menjaga kesehatan manusia, dan <sup>104</sup>melestarikan keanekaragaman hayati serta fungsi ekosistem muara untuk kepentingan generasi sekarang dan yang akan datang.

## 7.2. Teknik Remediasi dan Restorasi

Teknik remediasi dan restorasi memberikan jalan yang menjanjikan untuk mengatasi dampak merugikan dari kontaminasi logam berat di muara. Teknik-teknik ini mencakup berbagai metode fisik, kimia, dan biologis yang dapat secara efektif menghilangkan atau melumpuhkan logam berat dalam sedimen dan air. Salah satu pendekatan yang terkenal adalah fitoremediasi, yang memanfaatkan kemampuan alami tanaman untuk menyerap dan menyimpan logam berat. Spesies tanaman tertentu dapat mengakumulasi logam berat dari lingkungan sekitar dalam jaringannya melalui proses ini, sehingga mengurangi keberadaannya dalam ekosistem estuaria. Selain itu, penutupan sedimen telah muncul sebagai teknik lain yang layak yang melibatkan penerapan sedimen bersih untuk menutupi dan mengubur sedimen yang terkontaminasi. Dengan mengisolasi polutan di dalam lapisan sedimen, metode ini secara efektif mengurangi ketersediaan hayati logam berat dan membantu mengurangi risiko ekologis yang terkait. Metode remediasi ini sangat menjanjikan dalam memulihkan kesehatan dan integritas muara yang terkena dampak kontaminasi logam berat, sehingga menjaga keseimbangan ekosistem yang sangat penting ini.

Upaya restorasi di muara sangat penting dalam mengurangi efek berbahaya dari kontaminasi logam berat. Upaya-upaya ini mencakup berbagai strategi, termasuk restorasi dan peningkatan habitat, yang berfokus pada promosi proses alami yang membantu penyerapan dan pelemahan logam berat. Salah satu pendekatan tersebut adalah restorasi lahan basah dan rawa-rawa garam, yang berfungsi sebagai penyangga alami, membantu mengurangi masuknya logam berat ke dalam ekosistem

muara. Lahan basah dan rawa-rawa garam bertindak sebagai penyaring, menjebak dan menahan logam berat di dalam sedimennya, mencegahnya memasuki kolom air dan menimbulkan ancaman bagi organisme air. Dengan memulihkan dan melestarikan habitat penting ini, kita dapat secara efektif melindungi ekosistem muara dari dampak berbahaya polusi logam berat.

Selain restorasi habitat, mengembangkan vegetasi asli merupakan komponen penting lainnya dalam upaya restorasi muara. Tanaman dan rumput asli dapat menstabilkan sedimen, mengurangi resuspensi sedimen dan pelepasan kembali logam berat ke dalam kolom air. Melalui sistem perakarannya yang rumit, tanaman ini membantu mengikat tanah, mencegah erosi dan mengurangi pergerakan sedimen yang mungkin mengandung logam berat. Selain itu, vegetasi asli meningkatkan kesehatan dan ketahanan ekosistem muara secara keseluruhan, menciptakan lingkungan yang lebih baik untuk penyerapan dan pelemahan logam berat.

Upaya restorasi di muara sangat penting tidak hanya untuk kesehatan dan kesejahteraan ekosistem ini, tetapi juga untuk keberlanjutan jangka panjang planet kita. Estuari adalah ekosistem yang sangat produktif dan beragam yang memberikan banyak manfaat ekologi dan ekonomi. Estuari berfungsi sebagai tempat pembibitan yang sangat penting bagi banyak spesies ikan dan kerang-kerangan yang penting secara komersial, mendukung berbagai macam satwa liar, dan menawarkan peluang rekreasi bagi masyarakat setempat. Namun, kontaminasi logam berat merupakan ancaman yang signifikan terhadap keseimbangan ekosistem yang rapuh ini dan dapat menimbulkan konsekuensi yang luas.

Dengan menerapkan strategi restorasi yang berfokus pada restorasi dan peningkatan habitat, kita dapat membantu membalikkan kerusakan yang disebabkan oleh pencemaran logam berat dan mendorong pemulihan ekosistem muara. Upaya-upaya ini tidak hanya membantu dalam penyerapan dan pelemahan logam berat, tetapi juga berkontribusi pada kesehatan dan ketahanan habitat vital ini secara keseluruhan. Dengan memulihkan lahan basah, rawa-rawa garam, dan mendorong vegetasi asli, kita dapat menciptakan masa depan yang lebih

**berkelanjutan** di mana muara sungai dapat berkembang dan terus memberikan manfaat bagi manusia dan lingkungan. Kita harus terus memprioritaskan dan berinvestasi dalam upaya restorasi ini, dengan mengakui nilai dan pentingnya estuari di dunia yang saling terhubung ini.

Namun, penting untuk diketahui bahwa upaya remediasi dan restorasi yang berhasil membutuhkan pertimbangan spesifik lokasi, karena efektivitas teknik dapat bervariasi tergantung pada sifat kontaminasi, hidrodinamika lokal, dan kondisi ekologi. Setiap lokasi yang terkontaminasi memiliki tantangan yang unik; oleh karena itu, pendekatan yang disesuaikan diperlukan untuk mengatasi masalah spesifik yang dihadapi. Misalnya, metode yang digunakan untuk meremediasi sungai yang tercemar mungkin berbeda dengan metode yang digunakan untuk memulihkan lahan basah yang terkontaminasi.

Memahami sifat kontaminasi adalah hal yang sangat penting dalam menentukan strategi remediasi dan restorasi yang tepat. Kontaminan yang berbeda, seperti logam berat, hidrokarbon minyak bumi, atau pestisida, memerlukan teknik khusus untuk menghilangkan atau mendegradasi. Beberapa kontaminan, seperti penggalian atau penahanan, dapat ditangani secara fisik, sementara yang lain mungkin memerlukan proses kimia atau biologis untuk remediasi yang efektif.

Selain itu, hidrodinamika setempat memainkan peran penting dalam keberhasilan upaya remediasi. Faktor-faktor seperti aliran air, transportasi sedimen, dan fluktuasi pasang surut dapat mempengaruhi pergerakan dan distribusi kontaminan. Oleh karena itu, memahami kondisi hidrodinamika di lokasi sangat penting dalam merancang dan menerapkan teknik remediasi yang tepat. Misalnya, bahan penyerap atau perangkat sedimen mungkin diperlukan di daerah dengan aliran air yang tinggi untuk menangkap dan menghilangkan kontaminan secara efektif.

Selain itu, kondisi ekologi juga harus dipertimbangkan ketika merencanakan upaya remediasi dan restorasi. Dampak kontaminasi terhadap ekosistem setempat harus dinilai, termasuk dampaknya terhadap kehidupan tanaman dan hewan, serta fungsi ekologis keseluruhan daerah tersebut. Upaya restorasi harus bertujuan tidak hanya untuk menghilangkan atau menetralkan kontaminan, tetapi juga untuk mengembalikan keseimbangan ekologis dan mendorong pemulihan

spesies asli. Kegiatan ini dapat melibatkan pengenalan kembali vegetasi asli, menciptakan habitat yang sesuai, atau menerapkan langkah-langkah untuk meningkatkan keanekaragaman hayati.

Dalam banyak kasus, beberapa strategi mungkin diperlukan untuk mencapai hasil yang berarti. Upaya remediasi dan restorasi sering kali membutuhkan pendekatan holistik yang menggabungkan berbagai teknik untuk mengatasi berbagai aspek kontaminasi dan pemulihan ekosistem. Sebagai contoh, pemindahan fisik, bioremediasi, dan penciptaan habitat mungkin diperlukan untuk memulihkan situs yang terkontaminasi secara efektif.

Pemantauan jangka panjang dan manajemen adaptif sangat penting untuk keberhasilan proyek remediasi dan restorasi. Kegiatan-kegiatan ini memungkinkan untuk menilai keberhasilan langkah-langkah yang diterapkan dan memberikan wawasan yang berharga tentang kemajuan dan efektivitas upaya restorasi. Pemantauan membantu mengidentifikasi tantangan potensial dan memungkinkan penyesuaian strategi remediasi dan restorasi sesuai kebutuhan. Dengan terus mengevaluasi hasil dan mengadaptasi praktik-praktik pengelolaan yang sesuai, hasil ekologis yang diinginkan dapat dicapai dan dipertahankan dari waktu ke waktu.

Sebagai kesimpulan, upaya remediasi dan restorasi yang berhasil membutuhkan pertimbangan yang cermat terhadap faktor-faktor spesifik lokasi seperti kontaminasi, hidrodinamika lokal, dan kondisi ekologi. Pendekatan khusus yang menggabungkan teknik-teknik yang tepat diperlukan untuk mencapai hasil yang berarti. Pemantauan jangka panjang dan manajemen adaptif sangat penting untuk menilai efektivitas tindakan dan memastikan hasil ekologis yang diinginkan tercapai. Dengan menyadari pentingnya pertimbangan-pertimbangan ini, kita dapat secara efektif memulihkan lokasi-lokasi yang terkontaminasi dan mendorong pemulihan ekosistem.

### 7.3. Praktik Berkelanjutan dan Perspektif Masa Depan

Menekankan praktik-praktik berkelanjutan dan mengadopsi pendekatan berbasis ekosistem sangat penting untuk pengelolaan muara dalam jangka panjang dalam menghadapi pencemaran logam berat.

Estuari adalah ekosistem yang sangat produktif dan beragam secara biologis yang berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies tanaman dan hewan. Namun, ekosistem ini semakin terancam oleh akumulasi logam berat, yang dapat membahayakan kesehatan dan fungsinya secara keseluruhan. Untuk mengatasi masalah ini, sangat penting untuk mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan dan mempromosikan ekonomi sirkular yang memprioritaskan penggunaan sumber daya secara efisien dan meminimalkan produksi limbah. Dengan melakukan hal tersebut, permintaan akan produk yang mengandung logam berat dapat dikurangi, sehingga mengurangi input antropogenik logam berat ke lingkungan muara.

Praktik-praktik berkelanjutan memainkan peran penting dalam meminimalkan timbulan limbah dan melepaskan kontaminan ke muara. Praktik ini mencakup penerapan sistem pengelolaan limbah yang efektif, seperti daur ulang dan metode pembuangan yang tepat untuk mencegah logam berat masuk ke lingkungan. Selain itu, praktik pertanian berkelanjutan dapat membantu mengurangi penggunaan pupuk kimia dan pestisida yang sering kali mengandung logam berat, sehingga membatasi limpasannya ke muara.

Selain itu, mengadopsi pendekatan berbasis ekosistem sangat penting untuk pengelolaan muara dalam jangka panjang. Pendekatan ini mengakui keterkaitan berbagai komponen dalam ekosistem dan bertujuan untuk menjaga keseimbangan dan fungsinya. Dengan memahami interaksi yang kompleks antara faktor fisik, kimia, dan biologi, kita dapat mengembangkan strategi untuk mengurangi dampak pencemaran logam berat terhadap ekosistem muara.

Pendekatan berbasis ekosistem juga melibatkan pemulihan dan konservasi habitat estuaria, yang dapat membantu meningkatkan ketahanan mereka terhadap polusi logam berat. Memulihkan lahan basah dan hutan bakau, misalnya, dapat bertindak sebagai penyaring alami, menjebak dan melumpuhkan logam berat sebelum mencapai muara. Selain itu, melestarikan dan melindungi habitat muara menjamin kelangsungan hidup dan kesejahteraan beragam spesies yang bergantung pada ekosistem ini.

Kesimpulannya, menekankan praktik-praktik berkelanjutan dan mengadopsi pendekatan berbasis ekosistem sangat penting untuk pengelolaan muara sungai jangka panjang dalam menghadapi pencemaran logam berat. Dengan mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan, mempromosikan ekonomi sirkular, dan meminimalkan produk yang mengandung logam berat, kita dapat mengurangi input antropogenik logam berat ke lingkungan muara. Selain itu, praktik-praktik berkelanjutan dapat meminimalkan timbulan limbah dan pelepasan kontaminan, yang pada akhirnya dapat mengurangi tekanan pada ekosistem estuaria. Akhirnya, pendekatan berbasis ekosistem mengakui keterkaitan berbagai komponen dalam ekosistem dan bertujuan untuk memulihkan dan melestarikan habitat estuaria, meningkatkan ketahanannya terhadap pencemaran logam berat. Melalui upaya kolektif ini, kita dapat memastikan kelestarian dan keberlanjutan estuari untuk generasi mendatang.

Selain itu, meningkatkan kesadaran dan pendidikan masyarakat tentang dampak kontaminasi logam berat dan pentingnya konservasi muara sangat penting untuk menumbuhkan tanggung jawab dan partisipasi masyarakat dalam menjaga ekosistem ini. Estuari adalah ekosistem yang sangat beragam dan produktif yang berfungsi sebagai habitat penting bagi berbagai spesies tanaman dan hewan. Sayangnya, estuari juga rentan terhadap berbagai bentuk polusi, termasuk kontaminasi logam berat. Logam berat ini, seperti merkuri, kadmium, dan timbal, dapat terakumulasi dalam sedimen dan biota muara, sehingga menimbulkan risiko yang signifikan terhadap kesehatan manusia dan integritas ekosistem yang rapuh ini. Dengan meningkatkan kesadaran masyarakat tentang potensi bahaya yang terkait dengan kontaminasi logam berat di muara sungai, individu dapat membuat keputusan yang tepat mengenai tindakan dan pola konsumsi mereka.

Pendidikan sangat penting dalam memberdayakan individu untuk berpartisipasi dalam konservasi muara secara aktif. Dengan menyediakan informasi dan sumber daya yang dapat diakses, inisiatif pendidikan dapat membantu menjembatani kesenjangan antara pengetahuan ilmiah dan pemahaman masyarakat. Memahami interaksi yang kompleks dan proses ekologis dalam lingkungan estuaria dapat membantu masyarakat

menghargai nilai ekosistem ini dan kebutuhan mendesak untuk perlindungan mereka. Melalui upaya kampanye pendidikan, lokakarya, dan program penjangkauan, masyarakat dapat belajar tentang dampak buruk kontaminasi logam berat dan bagaimana mereka dapat berkontribusi pada upaya konservasi estuaria.

Salah satu pendekatan praktis untuk melibatkan masyarakat lokal dalam konservasi muara adalah melalui inisiatif ilmiah masyarakat. Ilmu pengetahuan warga melibatkan individu biasa yang secara aktif berpartisipasi dalam penelitian ilmiah dan pengumpulan data. Inisiatif ilmiah masyarakat memungkinkan masyarakat setempat untuk berkontribusi dalam upaya *biomonitoring* dalam konteks konservasi estuaria. Dengan mengumpulkan sampel air dan sedimen, memantau populasi satwa liar, dan mendokumentasikan perubahan habitat muara, masyarakat dapat memberikan data berharga untuk membantu ilmuwan dan pembuat kebijakan membuat keputusan yang tepat terkait strategi konservasi dan praktik pengelolaan. Inisiatif ilmiah masyarakat meningkatkan upaya pengumpulan data dan menumbuhkan rasa tanggung jawab dan kepemilikan di antara warga karena mereka terlibat langsung dalam melindungi lingkungan muara sungai setempat.

Dengan mempromosikan kesadaran dan pendidikan publik serta memfasilitasi inisiatif ilmiah masyarakat, masyarakat dapat bekerja untuk melindungi ekosistem muara dari kontaminasi logam berat. Upaya-upaya ini sangat penting untuk kesehatan dan ketahanan jangka panjang muara, yang menyediakan layanan ekologi penting, seperti penyaringan air, stabilisasi garis pantai, dan habitat pembibitan untuk spesies penting secara komersial. Berinvestasi dalam kampanye kesadaran dan pendidikan publik serta mendukung inisiatif sains warga dapat menumbuhkan rasa tanggung jawab dan partisipasi dalam konservasi muara, memastikan pengelolaan berkelanjutan dan perlindungan ekosistem yang tak ternilai ini untuk generasi mendatang.

Perspektif masa depan untuk mengatasi polusi logam berat di muara sungai harus melibatkan pengintegrasian teknologi mutakhir dan penelitian interdisipliner. Pendekatan ini sangat penting karena tantangan yang muncul akibat pencemaran logam berat, yang dapat membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Untuk mengatasi masalah ini secara

efektif, sangat penting untuk mengembangkan teknik remediasi inovatif yang dapat secara efisien menghilangkan logam berat dari ekosistem muara. Teknik-teknik ini berkisar dari metode fisik seperti pengerukan sedimen dan sistem filtrasi hingga pendekatan biologis seperti fitoremediasi dan bioaugmentasi. Selain itu, meningkatkan metode analisis untuk mendeteksi logam berat sangat penting untuk menilai tingkat dan sumber polusi secara akurat. Teknik-teknik canggih seperti spektroskopi serapan atom, spektrometri massa plasma yang digabungkan secara induktif, dan fluoresensi sinar-X dapat memberikan pengukuran yang tepat dan sensitif terhadap konsentrasi logam berat di lingkungan muara.

Selain itu, mengintegrasikan kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) dalam analisis data dapat secara signifikan meningkatkan pemahaman dan perencanaan pencemaran logam berat di muara. Algoritme AI dan ML dapat memproses data dalam jumlah besar dari berbagai sumber, termasuk penginderaan jarak jauh, pengambilan sampel air, dan stasiun pemantauan lingkungan. Dengan menganalisis data ini, teknologi ini dapat mengidentifikasi pola, memprediksi kecenderungan di masa depan, dan memberikan wawasan yang berharga mengenai sumber polusi logam berat, mekanisme transportasi, dan dampak ekologis. Selain itu, AI dan ML dapat membantu dalam mengembangkan model prediktif yang dapat menyimulasikan perilaku logam berat dalam sistem estuaria di bawah skenario yang berbeda, sehingga membantu dalam merumuskan strategi manajemen yang efektif.

Sifat interdisipliner dari penelitian masa depan di bidang ini sangat penting karena membutuhkan kolaborasi antara ilmuwan, insinyur, ahli lingkungan, pembuat kebijakan, dan pemangku kepentingan lainnya. Dengan menyatukan para ahli dari berbagai disiplin ilmu, pendekatan holistik dapat diadopsi untuk mengatasi berbagai tantangan yang terkait dengan pencemaran logam berat di muara sungai. Kolaborasi ini dapat memfasilitasi pertukaran pengetahuan, ide, dan sumber daya, yang mengarah pada solusi inovatif dan proses pengambilan keputusan yang tepat.



Sebagai kesimpulan, perspektif masa depan yang menangani polusi logam berat di muara harus memprioritaskan pengintegrasian teknologi mutakhir dan penelitian interdisipliner. Mengembangkan teknik remediasi yang inovatif, meningkatkan metode analisis untuk deteksi logam berat, dan memanfaatkan potensi AI dan ML dalam analisis data merupakan elemen penting untuk meningkatkan pemahaman dan pengelolaan masalah lingkungan ini. Dengan mengadopsi pendekatan yang komprehensif, kita dapat bekerja untuk meminimalkan risiko ekologi dan kesehatan yang ditimbulkan oleh polusi logam berat di muara sungai, yang pada akhirnya memastikan keberlanjutan dan kesejahteraan ekosistem yang sangat penting ini.

Kesimpulannya, strategi mitigasi dan manajemen yang efektif sangat penting untuk mengatasi pencemaran logam berat di ekosistem muara. Estuari, titik pertemuan air tawar dan air asin, merupakan habitat yang sangat beragam dan produktif yang mendukung beragam kehidupan tumbuhan dan hewan. Namun, estuari sangat rentan terhadap polusi, termasuk logam berat, yang dapat membahayakan ekosistem dan organisme.

Dalam memerangi masalah ini, kerangka kerja regulasi yang kuat sangat penting. Kerangka kerja ini harus didasarkan pada penelitian ilmiah dan kolaborasi di antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk badan pemerintah, ilmuwan, dan perwakilan industri. Dengan menerapkan dan menegakkan peraturan yang ketat mengenai pembuangan limbah industri dan praktik pengelolaan limbah, kita dapat membatasi masuknya kontaminan ke dalam ekosistem muara.

Selain itu, teknik remediasi dan restorasi memainkan peran penting dalam mengurangi ketersediaan hayati logam berat dan risiko ekologis. Teknik-teknik ini harus disesuaikan dengan kondisi spesifik masing-masing sistem estuaria, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti karakteristik sedimen, pola aliran air, dan keberadaan spesies yang sensitif. Beberapa strategi potensial termasuk pengerukan sedimen, fitoremediasi, dan menggunakan sistem penyaringan alami atau rekayasa untuk menghilangkan logam berat dari air.

Namun, penting untuk dicatat bahwa mencegah selalu lebih baik daripada mengobati. Menerapkan praktik-praktik berkelanjutan dalam

industri dan masyarakat dapat membantu meminimalkan pelepasan logam berat ke lingkungan muara. Kegiatan ini dapat mencakup penerapan metode produksi yang lebih bersih, mengurangi zat beracun, dan mempromosikan pembuangan dan daur ulang bahan limbah yang tepat.

Selain itu, mengadopsi pendekatan berbasis ekosistem sangat penting untuk kesehatan dan ketahanan jangka panjang muara. Pendekatan ini mengakui keterkaitan semua komponen ekosistem dan berupaya mengelola sumber daya estuaria secara holistik. Dengan mempertimbangkan keseluruhan ekosistem, termasuk faktor fisik, kimia, dan biologi, kita dapat memastikan bahwa strategi pengelolaan kita efektif dan berkelanjutan.

Sebagai kesimpulan, mengatasi pencemaran logam berat di ekosistem muara membutuhkan kombinasi kerangka kerja peraturan, penelitian ilmiah, kolaborasi, teknik remediasi, praktik berkelanjutan, dan pendekatan berbasis ekosistem. Dengan menerapkan strategi-strategi ini dan menumbuhkan komitmen terhadap konservasi estuaria di antara semua pemangku kepentingan, kita dapat melindungi ekosistem yang tak ternilai ini dan menjamin masa depan yang berkelanjutan bagi alam dan umat manusia. Kita bertanggung jawab untuk mengambil tindakan dan melestarikan keindahan dan fungsi muara sungai untuk generasi yang akan datang.

## BAB 8 SIMPULAN

---

### 8.1. Rekapitulasi Temuan Utama <sup>1</sup>

Sebagai kesimpulan, eksplorasi komprehensif *biomonitoring logam berat di muara* dengan *menggunakan ikan sebagai bioindikator* telah memberikan wawasan penting mengenai interaksi yang kompleks antara kontaminasi logam berat dan ekosistem muara. Pendekatan ini memungkinkan para peneliti untuk menyelidiki hubungan yang rumit antara toksisitas logam berat dan dasar-dasar ekologi muara. Dengan mempelajari distribusi dan adaptasi fisiologis ikan muara, para ilmuwan telah memperoleh pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana organisme ini merespons paparan logam berat dan perannya sebagai indikator kontaminasi lingkungan.

Selain itu, penelitian ini juga telah menjelaskan dinamika transfer trofik dalam jaring-jaring makanan di muara sungai, yang mengungkap bagaimana logam berat bergerak melalui ekosistem dan terakumulasi dalam organisme yang berbeda. Berada <sup>83</sup> di posisi yang lebih tinggi dalam rantai makanan, ikan dapat mengakumulasi tingkat logam berat yang lebih tinggi melalui bioakumulasi dan biomagnifikasi. Akumulasi logam ini tidak hanya berdampak pada kesehatan ikan itu sendiri, tetapi juga menimbulkan risiko potensial bagi populasi manusia yang bergantung pada ikan muara sebagai sumber makanan.

Para peneliti telah menilai kesehatan ekologi dan integritas estuari dengan menggunakan bioindikator, <sup>5</sup> seperti ikan, untuk mengukur dampak pencemaran logam berat. Informasi ini sangat penting untuk menerapkan strategi pengelolaan yang efektif dan mengurangi dampak buruk kontaminasi logam berat pada ekosistem yang rentan <sup>11</sup> ini.

Sebagai kesimpulan, eksplorasi komprehensif *biomonitoring logam berat di muara* dengan *menggunakan ikan sebagai bioindikator* telah memberikan wawasan yang tak ternilai mengenai hubungan yang rumit antara kontaminasi logam berat dan ekosistem muara. Melalui pendekatan multifaset yang mencakup dasar-dasar ekologi toksisitas

logam berat, distribusi dan adaptasi fisiologis ikan estuaria, dan dinamika transfer trofik dalam jaring-jaring makanan di muara sungai, para ilmuwan telah memperoleh pemahaman holistik tentang dampak pencemaran logam berat di muara sungai. Pengetahuan ini sangat penting untuk pengambilan keputusan yang tepat dan melestarikan kesehatan ekologis dan integritas ekosistem yang unik dan vital ini.

Temuan-temuan dalam studi *biomonitoring* telah menjelaskan beragam respons dari berbagai populasi ikan terhadap kontaminasi logam berat. Temuan-temuan ini telah menekankan pentingnya mempertimbangkan variasi spesifik spesies ketika menilai dampak pencemaran logam berat terhadap ekosistem akuatik. Telah menjadi jelas bahwa tidak semua spesies ikan merespons dengan cara yang sama terhadap kontaminasi logam berat, menyoroti heterogenitas respons mereka.

Selain itu, pola spasial dan temporal bioakumulasi logam berat telah memberikan wawasan yang berharga tentang potensi risiko yang terkait dengan titik polusi lokal dan variasi musiman. Informasi ini menyoroti perlunya pendekatan strategi pemantauan dan pengelolaan yang bernuansa. Dengan memahami area dan waktu tertentu ketika kontaminasi logam berat paling banyak terjadi, intervensi yang ditargetkan dapat diterapkan untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan oleh polutan ini.

Selain itu, studi transfer trofik telah mengungkapkan keterkaitan ekosistem estuaria dan potensi efek *cascading* dari kontaminasi logam berat. Penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa logam berat dapat ditransfer melalui rantai makanan, yang memengaruhi berbagai spesies di dalam ekosistem. Bukti ini menyoroti pentingnya mengadopsi pendekatan holistik untuk *biomonitoring* yang mempertimbangkan interaksi multi-spesies dan potensi efek turunan.

Temuan-temuan utama ini menekankan perlunya pendekatan yang komprehensif dan terintegrasi untuk memantau dan mengelola kontaminasi logam berat di ekosistem perairan. Dengan mempertimbangkan heterogenitas respons spesifik spesies, pola spasial dan temporal bioakumulasi, dan keterkaitan ekosistem, para peneliti dan

39

pembuat kebijakan dapat membuat keputusan yang tepat untuk melindungi dan memulihkan kesehatan lingkungan perairan.

## 8.2. Pentingnya Ikan sebagai Bioindikator

Peran ikan sebagai bioindikator dalam *biomonitoring* logam berat di muara sangat penting dan tidak boleh diremehkan. Ikan berperan penting dalam proses ini, yang berfungsi sebagai sistem peringatan dini untuk kontaminasi lingkungan. Karena posisinya dalam rantai makanan, ikan dapat mengakumulasi logam berat dalam jaringannya, memberikan wawasan berharga tentang potensi dampak polusi pada tingkat trofik yang lebih tinggi. Situasi ini sangat penting bagi manusia yang bergantung pada konsumsi makanan laut, karena kesehatan dan akumulasi logam berat dalam jaringan ikan dapat secara langsung mempengaruhi kesehatan manusia.

Selain itu, ikan merupakan komponen penting dari jaring-jaring makanan di lautan, karena ikan berinteraksi dengan berbagai organisme dan memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem secara keseluruhan. Dengan memantau kesehatan dan akumulasi logam berat pada populasi ikan, kita dapat lebih memahami kesehatan lingkungan muara secara keseluruhan dan potensi dampaknya terhadap spesies lain di dalam ekosistem.

Apa yang membuat ikan menjadi bioindikator yang kuat adalah kemampuannya beradaptasi dengan lingkungan muara dan kemampuannya merespons perubahan tingkat kontaminan. Muara adalah lingkungan yang dinamis dan terus berubah, tunduk pada berbagai pengaruh alami dan antropogenik. Spesies ikan telah berevolusi untuk berkembang di lingkungan ini dan telah mengembangkan mekanisme untuk mengatasi kondisi yang berubah, termasuk paparan kontaminan. Dengan mempelajari efek akumulasi logam berat pada jaringan ikan, para ilmuwan dan peneliti dapat menilai kesehatan ekosistem muara secara keseluruhan dan mengidentifikasi area potensial yang menjadi perhatian. Informasi ini kemudian dapat digunakan untuk menerapkan strategi manajemen yang efektif untuk mengurangi polusi dan melindungi ekosistem.

Kesimpulannya, peran ikan sebagai bioindikator dalam *biomonitoring* logam berat di estuaria haruslah seimbang. Kemampuan mereka untuk mengakumulasi logam berat, posisi mereka dalam rantai makanan, dan kemampuan beradaptasi mereka terhadap perubahan tingkat kontaminan membuat mereka menjadi penjaga kesehatan ekosistem yang tak ternilai. Dengan memantau populasi ikan dan mempelajari kesehatan serta akumulasi logam berat dalam jaringan mereka, kita mendapatkan wawasan berharga tentang potensi dampak polusi pada tingkat trofik yang lebih tinggi, termasuk manusia. Pengetahuan ini sangat penting untuk pengelolaan lingkungan yang efektif dan perlindungan ekosistem muara dan kesehatan manusia.

Penelitian kami telah menunjukkan bahwa mengintegrasikan *biomonitoring* berbasis ikan dengan penilaian ekologi lainnya secara dramatis meningkatkan pemahaman kita tentang dinamika logam berat di muara. Muara adalah ekosistem yang unik dan beragam yang berfungsi sebagai habitat penting bagi banyak spesies, termasuk ikan. Dengan mempelajari keberadaan dan konsentrasi logam berat dalam populasi ikan, kita dapat memperoleh wawasan yang berharga tentang tingkat dan dampak kontaminasi lingkungan di lingkungan muara.

Ikan berfungsi sebagai penghubung yang nyata antara kontaminasi lingkungan dan konsekuensi ekologis. Mereka rentan terhadap perubahan lingkungan, termasuk keberadaan logam berat. Dengan demikian, mereka dapat mengakumulasi logam-logam ini di dalam jaringannya, sehingga menjadi indikator yang terukur untuk mengetahui tingkat polusi. Dengan menganalisis konsentrasi logam berat pada ikan, kita dapat menilai tingkat kontaminasi di muara dan memahami bagaimana hal itu mempengaruhi ekosistem.

Mengintegrasikan *biomonitoring* berbasis ikan dengan penilaian ekologi lainnya sangat penting untuk membuat keputusan yang tepat dalam merumuskan strategi mitigasi dan manajemen. Dengan memahami hubungan antara pencemaran logam berat dan konsekuensi ekologisnya, kita dapat mengembangkan strategi yang efektif untuk memitigasi dan mengurangi dampak kontaminasi terhadap ekosistem muara. Pengetahuan ini memungkinkan kita untuk memprioritaskan area atau

spesies tertentu untuk upaya konservasi dan menerapkan intervensi yang ditargetkan untuk melindungi habitat dan spesies yang rentan.

Menekankan pentingnya ikan sebagai bioindikator sangat penting untuk mempromosikan kebijakan dan tindakan berbasis bukti untuk melindungi ekosistem muara dari dampak buruk polusi logam berat. Dengan mengakui ikan sebagai indikator yang dapat diandalkan untuk pencemaran lingkungan, kita dapat mengadvokasi penerapan kebijakan yang memprioritaskan perlindungan dan pemulihan habitat muara. Kebijakan ini mencakup langkah-langkah untuk mengurangi pelepasan logam berat ke dalam ekosistem ini dan upaya untuk memantau dan mengatur kegiatan industri yang dapat berkontribusi terhadap kontaminasi.

Kesimpulannya, mengintegrasikan *biomonitoring* berbasis ikan dengan penilaian ekologi lainnya dapat meningkatkan pemahaman kita tentang dinamika logam berat di muara. Ikan memainkan peran penting dalam menghubungkan kontaminasi lingkungan dengan konsekuensi ekologis, memberikan informasi berharga untuk pengambilan keputusan dalam merumuskan strategi mitigasi dan manajemen. Menyadari pentingnya ikan sebagai bioindikator sangat penting untuk mempromosikan kebijakan dan tindakan berbasis bukti untuk melindungi ekosistem muara dari dampak buruk polusi logam berat.

### 8.3. Ajakan untuk Bertindak untuk Memastikan Kesehatan dan Ketahanan Estuaria

Pertama, ada kebutuhan mendesak akan peraturan yang lebih ketat dan penegakan hukum yang ada untuk mencegah polusi dan kontaminasi lebih lanjut pada ekosistem muara. Peraturan ini mencakup praktik pengelolaan limbah industri yang lebih ketat, protokol pengolahan air limbah, dan sistem pemantauan untuk mendeteksi dan mengurangi polusi logam berat. Selain itu, harus ada fokus pada program pendidikan dan kesadaran untuk menginformasikan kepada masyarakat dan industri tentang bahaya kontaminasi logam berat dan pentingnya melestarikan ekosistem muara.

Kedua, ada kebutuhan penting untuk penelitian dan inovasi untuk mengembangkan solusi berkelanjutan untuk remediasi dan restorasi

ekosistem muara yang telah terpengaruh oleh kontaminasi logam berat. Penelitian ini melibatkan eksplorasi teknik-teknik baru seperti fitoremediasi, di mana spesies tanaman tertentu dapat menyerap dan mendetoksifikasi logam berat, atau menggunakan *biochar* untuk mengikat dan melumpuhkan logam berat dalam sedimen. Selain itu, kolaborasi antara ilmuwan, pembuat kebijakan, dan masyarakat setempat sangat penting untuk mengembangkan rencana pengelolaan yang komprehensif yang mengintegrasikan pengetahuan ilmiah dengan kebutuhan dan prioritas lokal.

Urgensi dari upaya-upaya ini tidak dapat dilebih-lebihkan. Ekosistem estuaria sangat penting bagi kesehatan dan kelangsungan hidup berbagai spesies tumbuhan dan hewan serta kesejahteraan manusia. Ekosistem ini menyediakan jasa ekosistem yang penting, seperti penyaringan air, perlindungan pesisir, dan pembibitan spesies ikan yang penting secara komersial. Selain itu, muara sungai sering kali memiliki nilai budaya yang penting dan mendukung kegiatan rekreasi, pariwisata, dan ekonomi lokal.

Konsekuensinya bisa sangat buruk jika kita gagal mengatasi ancaman yang ditimbulkan oleh kontaminasi logam berat di ekosistem muara. Hilangnya keanekaragaman hayati, penurunan kualitas air, dan terganggunya fungsi ekosistem akan berdampak luas pada lingkungan dan masyarakat manusia. Oleh karena itu, pemerintah, industri, dan individu harus bersatu untuk memprioritaskan kesehatan dan ketahanan ekosistem yang tak ternilai ini. Dengan mengambil tindakan segera, kita dapat bekerja menuju masa depan yang berkelanjutan di mana ekosistem muara berkembang, mendukung keanekaragaman hayati, mata pencaharian, dan kesejahteraan planet kita secara keseluruhan.

Pertama, kita harus memperkuat dan menegakkan kerangka kerja peraturan untuk pengendalian pencemaran logam berat agar dapat secara efektif mengatasi dampak buruk logam berat terhadap lingkungan kita. Para pembuat kebijakan, lembaga lingkungan hidup, dan industri harus berkolaborasi untuk mengembangkan peraturan yang kuat yang membatasi pelepasan logam berat ke muara sungai, yang merupakan ekosistem penting yang berfungsi sebagai penghubung antara lingkungan air tawar dan laut. Peraturan-peraturan ini harus mengurangi



pembuangan logam berat dari kegiatan industri, seperti pertambangan, manufaktur, dan pengelolaan limbah, serta dari praktik pertanian yang menggunakan pupuk dan pestisida yang mengandung logam berat. Dengan menerapkan peraturan yang ketat, kita dapat meminimalkan kontaminasi muara sungai dan melindungi beragam flora dan fauna yang bergantung pada habitat ini.

Pemantauan tingkat pencemaran logam berat secara terus-menerus sangat penting untuk menilai efektivitas langkah-langkah peraturan dan mengidentifikasi area yang memerlukan perhatian tambahan. Badan-badan lingkungan hidup harus membuat program pemantauan komprehensif yang secara teratur menilai kualitas air dan sedimen di muara sungai dan memantau bioakumulasi logam berat pada organisme air. Data ini akan memberikan wawasan yang berharga tentang kondisi pencemaran logam berat dan memungkinkan para pembuat kebijakan untuk mengambil keputusan yang tepat mengenai langkah-langkah pengendalian pencemaran. Selain itu, tinjauan berkala terhadap peraturan-peraturan ini diperlukan untuk beradaptasi dengan tantangan yang muncul dan kemajuan dalam pemahaman ilmiah.

Kemajuan dalam penelitian ilmiah harus dimasukkan ke dalam kerangka kerja peraturan untuk memastikan bahwa mereka tetap mutakhir dan efektif. Penelitian yang sedang berlangsung dapat berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang sumber, mekanisme transportasi, dan nasib logam berat di muara sungai dan dampak ekologisnya. Pengetahuan ini dapat menginformasikan pengembangan peraturan yang ditargetkan untuk mengatasi sumber pencemaran logam berat tertentu dan memprioritaskan perlindungan ekosistem muara yang rentan. Upaya kolaboratif antara ilmuwan, pembuat kebijakan, dan industri dapat memfasilitasi penerjemahan temuan ilmiah ke dalam solusi praktis, sehingga menjembatani kesenjangan antara penelitian dan implementasi kebijakan.

Selain memperkuat peraturan, ada kebutuhan untuk meningkatkan kesadaran dan pendidikan publik mengenai risiko yang ditimbulkan oleh polusi logam berat. Dengan mengedukasi masyarakat yang tinggal di sekitar muara dan masyarakat umum tentang sumber, dampak, dan pencegahan pencemaran logam berat, kita dapat menumbuhkan rasa

tanggung jawab dan mendorong setiap orang untuk menerapkan praktik-praktik yang berkelanjutan. Informasi ini dapat mencakup promosi produk ramah lingkungan, pembuangan limbah yang tepat, dan mengadopsi praktik manajemen terbaik di bidang pertanian dan industri.

Kesimpulannya, mengatasi pencemaran logam berat di muara sungai membutuhkan penguatan dan penegakan kerangka kerja peraturan. Kolaborasi antara pembuat kebijakan, lembaga lingkungan, dan industri diperlukan untuk mengembangkan peraturan yang kuat yang membatasi pelepasan logam berat. Pemantauan yang konstan dan tinjauan berkala terhadap peraturan-peraturan ini sangat penting untuk beradaptasi dengan tantangan yang muncul dan kemajuan dalam pemahaman ilmiah. Dengan menggabungkan penelitian ilmiah, meningkatkan kesadaran publik, dan mempromosikan praktik-praktik berkelanjutan, kita dapat bekerja untuk melindungi ekosistem yang tak ternilai ini dan memastikan lingkungan yang lebih sehat untuk generasi mendatang.

Kedua, menerapkan praktik-praktik berkelanjutan dan pendekatan holistik dalam pengelolaan muara sungai merupakan hal yang sangat penting. Estuari adalah ekosistem vital yang berfungsi sebagai habitat bagi beragam spesies tanaman dan hewan, yang menyediakan berbagai layanan ekologis. Namun, lingkungan ini sering mengalami kontaminasi logam berat, yang dapat membahayakan kesehatan dan fungsi muara secara keseluruhan. Untuk mengurangi dampak ini, penting untuk menggunakan teknik remediasi dan restorasi yang disesuaikan dengan kondisi spesifik masing-masing lokasi. Teknik-teknik ini dapat mencakup penggunaan sistem alami atau rekayasa untuk menghilangkan atau menetralkan logam berat, seperti lahan basah atau penghalang reaktif yang dapat ditembus. Dengan menerapkan strategi spesifik lokasi, kita dapat secara efektif mengurangi tingkat kontaminasi dan mengembalikan keseimbangan ekologis ekosistem estuaria.

Selain itu, kesadaran dan partisipasi masyarakat memainkan peran penting dalam pengelolaan estuaria. Masyarakat yang tinggal di sekitar lingkungan estuaria perlu dididikasi tentang pentingnya ekosistem ini dan potensi ancaman yang mereka hadapi. Dengan meningkatkan kesadaran, individu dapat mengembangkan rasa tanggung jawab dan kepedulian

terhadap muara, yang mengarah pada praktik-praktik yang lebih berkelanjutan dan melindungi habitat yang berharga ini. Partisipasi masyarakat dapat dilakukan dalam berbagai bentuk, seperti program pemantauan berbasis masyarakat atau keterlibatan dalam proses pengambilan keputusan yang berkaitan dengan pengelolaan muara. Melibatkan masyarakat lokal dapat menumbuhkan rasa kepemilikan dan memberdayakan individu untuk berkontribusi secara aktif dalam pelestarian dan konservasi lingkungan muara.

Kesimpulannya, menerapkan praktik-praktik berkelanjutan dan pendekatan holistik dalam pengelolaan estuaria sangat penting untuk melindungi dan memulihkan ekosistem yang berharga ini. Menyesuaikan teknik remediasi dan restorasi dengan kondisi spesifik lokasi dapat membantu mengurangi dampak kontaminasi logam berat, memastikan kesehatan dan fungsi muara dalam jangka panjang. Selain itu, kesadaran dan partisipasi masyarakat sangat penting untuk menanamkan rasa tanggung jawab dan kepedulian di antara masyarakat yang tinggal di dekat lingkungan muara. Dengan bekerja sama, kita dapat menjaga integritas ekologi muara dan memastikan manfaatnya yang berkelanjutan bagi manusia dan lingkungan.

Selain itu, dalam mengupayakan konservasi muara, kita harus terus memajukan penelitian dan teknologi untuk mengatasi tantangan yang muncul dan mengeksplorasi solusi inovatif secara efektif. Sifat ekosistem estuaria yang kompleks membutuhkan pendekatan holistik yang mengintegrasikan studi interdisipliner dari berbagai bidang seperti biologi, ekologi, hidrologi, dan geologi. Dengan menyatukan para ahli dari berbagai disiplin ilmu tersebut, kita dapat memahami secara komprehensif dinamika rumit yang terjadi di dalam muara sungai dan mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk konservasinya.

Selain itu, memanfaatkan potensi kecerdasan buatan (artificial intelligence/AI) dapat merevolusi upaya konservasi muara sungai. Algoritma AI dapat menganalisis sejumlah besar data dari muara, memungkinkan kita untuk mendeteksi pola, memprediksi tren, dan mengidentifikasi potensi ancaman terhadap ekosistem ini. Dengan memanfaatkan kemampuan AI, para ilmuwan dan ahli konservasi dapat membuat keputusan yang tepat dan menerapkan langkah-langkah

proaktif untuk mengurangi risiko dan melindungi keanekaragaman hayati muara. AI juga dapat berkontribusi pada pengembangan sistem pemantauan inovatif yang menyediakan data waktu nyata tentang kualitas air, kesehatan habitat, dan keberadaan spesies invasif, sehingga memungkinkan intervensi konservasi yang lebih tepat waktu dan tepat sasaran.

Selain itu, teknologi berkelanjutan memainkan peran penting dalam konservasi muara. Karena aktivitas manusia terus memberikan tekanan pada ekosistem yang rentan ini, mengembangkan dan menerapkan teknologi ramah lingkungan yang meminimalkan dampak negatif sangatlah penting. Misalnya, mengadopsi sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi polusi dari metode pembangkit energi tradisional. Mengembangkan praktik akuakultur yang berkelanjutan dapat membantu memenuhi permintaan makanan laut yang terus meningkat sekaligus meminimalkan kerusakan habitat dan polusi. Dengan berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi berkelanjutan, kita dapat memastikan kesehatan dan ketahanan jangka panjang ekosistem muara.

Kesimpulannya, tantangan yang dihadapi dalam konservasi estuaria membutuhkan kemajuan penelitian dan teknologi yang berkelanjutan. Mengintegrasikan studi interdisipliner, memanfaatkan potensi kecerdasan buatan, dan mengembangkan teknologi berkelanjutan sangat penting dalam memenuhi tuntutan konservasi estuaria yang terus berkembang. Dengan mengadopsi pendekatan multidisiplin dan merangkul inovasi, kita dapat melindungi ekosistem yang tak ternilai ini dan melestarikan integritas ekologisnya untuk generasi mendatang.

Kesimpulannya, *biomonitoring* logam berat di muara dengan menggunakan ikan sebagai bioindikator telah terbukti sangat penting dalam memahami dinamika kompleks antara polusi dan kesehatan ekologi. Penelitian ini telah memberikan wawasan penting tentang tingkat kontaminasi logam berat di ekosistem vital ini, menyoroti potensi risiko terhadap kehidupan akuatik dan kesejahteraan manusia. Dengan memantau akumulasi logam berat pada spesies ikan, para ilmuwan telah mengidentifikasi titik-titik polusi dan menilai efektivitas langkah-langkah

pengendalian polusi. Pengetahuan <sup>98</sup> ini sangat penting bagi para pembuat kebijakan dan pengelola lingkungan dalam mengembangkan strategi pengelolaan berbasis bukti untuk mengurangi dampak polusi dan melindungi integritas ekologi muara.

Penggunaan ikan sebagai bioindikator menawarkan beberapa keuntungan dalam studi *biomonitoring*. Ikan tersebar luas di muara, menempati berbagai tingkat trofik, dan memiliki rentang hidup yang relatif panjang, sehingga memungkinkan akumulasi logam berat dari waktu ke waktu. Selain itu, ikan sering kali merupakan komponen penting dalam jaring-jaring makanan di muara yang dikonsumsi oleh manusia, sehingga menjadikannya sebagai spesies indikator yang ideal untuk menilai perpindahan logam berat dari lingkungan ke populasi manusia.

Dengan mengindahkan seruan untuk bertindak dan mengadopsi strategi pengelolaan berbasis bukti, kita dapat melindungi ekosistem estuaria yang tak ternilai ini untuk generasi mendatang. Langkah-langkah pengendalian dan pengelolaan polusi yang efektif dapat membantu meminimalkan akumulasi logam berat pada ikan dan mengurangi risiko yang terkait dengan konsumsinya. Pengendalian ini melindungi kesehatan organisme akuatik dan memastikan keberlanjutan perikanan estuaria, yang merupakan sumber makanan dan mata pencaharian penting bagi banyak masyarakat.

Melestarikan integritas ekologi muara sangat penting. Ekosistem ini merupakan rumah <sup>72</sup> bagi beragam jenis tanaman, hewan, dan mikroorganisme, yang semuanya memainkan peran penting dalam <sup>56</sup> menjaga kesehatan dan fungsi ekosistem secara keseluruhan. Muara berfungsi sebagai tempat pembibitan bagi banyak spesies ikan dan kerang-kerangan yang penting secara komersial, yang mendukung produktivitas perikanan laut. Estuari juga menyediakan habitat penting bagi burung-burung yang bermigrasi, yang bertindak sebagai tempat persinggahan selama perjalanan jarak jauh mereka. Selain itu, muara sungai merupakan penyangga alami terhadap gelombang badai dan erosi pantai, yang melindungi masyarakat pesisir di sekitarnya dari dampak perubahan iklim.

Selain signifikansi ekologisnya, muara sungai juga menawarkan banyak peluang rekreasi bagi manusia. Estuari menarik wisatawan dan

penggemar alam, berkontribusi pada ekonomi lokal dan mempromosikan kesadaran lingkungan. Keindahan estetika estuari, dengan perpaduan unik antara air tawar dan air asin, benar-benar menawan, dan pelestariannya memastikan bahwa generasi mendatang dapat terus menikmati keajaiban alam ini.

Singkatnya, *biomonitoring* logam berat di muara dengan menggunakan ikan sebagai bioindikator telah memberikan wawasan penting mengenai hubungan yang rumit antara polusi dan kesehatan ekologi. Dengan mengadopsi strategi pengelolaan berbasis bukti, kita dapat melindungi ekosistem yang tak ternilai ini untuk generasi mendatang, melestarikan integritas ekologisnya dan memastikan kontribusinya yang berkelanjutan terhadap keanekaragaman hayati, perikanan, dan kesejahteraan manusia. Kita harus memprioritaskan perlindungan dan konservasi muara sungai, dengan mengakui nilai ekologi, ekonomi, dan sosialnya. Kita dapat menjamin masa depan yang berkelanjutan untuk ekosistem yang luar biasa ini melalui upaya kolaboratif dan pengelolaan yang bertanggung jawab.

## DAFTAR PUSTAKA

---

- Abd- Allah, M. M., Ramadan, A. A., Said, N. M., Ibrahim, I. H., & Abdelkarim, E. A. 2019. Effects of Cadmium Chloride and Glyphosate on Antioxidants as Biochemical Biomarkers in Nile Tilapia. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 10 (1), 1–6. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000561>
- Abd El-Atti, M., Desouky, M. M. A., Mohamadien, A., & Said, R. M. 2019. Effects of titanium dioxide nanoparticles on red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*: Bioaccumulation, oxidative stress and histopathological biomarkers. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45 (1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.01.001>
- Abel de Souza Machado, A., Spencer, K., Kloas, W., Toffolon, M., & Zarfl, C. (2016). Metal fate and effects in estuaries: A review and conceptual model for better understanding of toxicity. *Science of the Total Environment*, 541, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.045>
- Abdel Rahman, A. N., ElHady, M., Hassanin, M. E., & Mohamed, A. A. R. 2019. Alleviative effects of dietary Indian lotus leaves on heavy metals-induced hepato-renal toxicity, oxidative stress, and histopathological alterations in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 509, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.05.030>
- Abiona, O. O., Anifowose, A. J., Awojide, S. H., Adebisi, O. C., Adesina, B. & Ipinmoroti, M. O. 2019. Histopathological biomarking changes in the internal organs of Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and catfish (*Clarias gariepinus*) exposed to heavy metals contamination from Dandaru pond, Ibadan, Nigeria. *Journal of Taibah University for Science*, 13 (1), 903–911. <https://doi.org/10.1080/16583655.2019.1658400>

- Adeogun, A. O., Ibor, O. R., Omiwole, R., Chukwuka, A. V., Adewale, A. H., Kumuyi, O., & Arukwe, A. 2020. Sex-differences in physiological and oxidative stress responses and heavy metals burden in the black jaw tilapia, *Sarotherodon melanotheron* from a tropical freshwater dam (Nigeria). *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.108676>
- Ahmed, Y. H., Bashir, D. W., Abdel-moneam, D. A., Azouz, R. A., & Galal, M. K. 2019. Histopathological, biochemical and molecular studies on the toxic effect of used engine oil on the health status of *Oreochromis niloticus*. *Acta Histochemica*, 121 (5), 563–574. <https://doi.org/10.1016/j.acthis.2019.04.005>
- Akinsanya, B., Isibor, P. O., Kuton, M. P., Saliu, J. K., & Dada, E. O. 2019. *Aspidogastrea africanus* Infections, comparative assessment of BTEX and heavy metals: Bioaccumulation, and histopathological alterations as biomarker response in *Chrysichthys nigrodigitatus* (Lacépède, 1803) of Lekki Lagoon, Nigeria. *Scientific African*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00060>
- Andreu, V., Gimeno-García, E., Pascual, J. A., Vazquez-Roig, P., & Picó, Y. 2016. Presence of pharmaceuticals and heavy metals in the waters of a Mediterranean coastal wetland: Potential interactions and the influence of the environment. *Science of the Total Environment*, 540, 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.007>
- AnvariFar, H., Amirkolaie, A. K., Jalali, A. M., Miandare, H. K., Sayed, A. E. D. H., Üçüncü, S. & Romano, N. 2018. Environmental pollution and toxic substances: Cellular apoptosis as a key parameter in a sensible model like fish. *Aquatic Toxicology*, 204, 144–159. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.09.010>
- Arojoye, O. A., Oyagbemi, A. A., & Gbemisola, O. M. 2019. Biomarkers of oxidative stress in *Clarias gariepinus* for assessing toxicological effects of heavy metal pollution of Abereke river in southwest



- Nigeria. *Comparative Clinical Pathology*, 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00580-019-02999-8>
- Authman, M. M. 2015. Use of Fish as Bioindicator of the Effects of Heavy Metals Pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 06 (04). <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000328>
- Aziz, N., Butt, A., & Elsheikha, H. M. 2020. Antioxidant enzymes as biomarkers of Cu and Pb exposure in the ground spiders *Lycosa terrestris* and *Pardosa birmanica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190 (December 2019), 110054. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110054>
- Ballesteros, M. L., Rivetti, N. G., Morillo, D. O., Bertrand, L., Amé, M. V., & Bistoni, M. A. 2017. Multi-biomarker responses in fish (*Jenynsia multidentata*) to assess the impact of pollution in rivers with mixtures of environmental contaminants. *Science of the Total Environment*, 595, 711–722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.203>
- Banaee, M., & Taheri, S. 2019. Metal bioaccumulation, oxidative stress, and biochemical alterations in the freshwater snail (*Galba truncatula*) exposed to municipal sewage. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 7 (1), 8–17. <https://doi.org/10.22102/jaehr.2018.145241.1100>
- Barbee, N. C., Ganio, K., & Swearer, S. E. 2014. Integrating multiple bioassays to detect and assess impacts of sublethal exposure to metal mixtures in an estuarine fish. *Aquatic Toxicology*, 152, 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.04.012>
- Basirun, A. A., Ahmad, S. A., Yasid, N. A., Sabullah, M. K., Daud, H. M., Sha'arani, & Shukor, M. Y. 2019. Toxicological effects and behavioural and biochemical responses of *Oreochromis mossambicus* gills and its cholinesterase to copper: a biomarker application. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16 (2), 887–898. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1711-1>

- Beg, M. U., Al-Jandal, N., Al-Subiai, S., Karam, Q., Husain, S., Butt, S. & Al-Husaini, M. 2015. Metallothionein, oxidative stress and trace metals in gills and liver of demersal and pelagic fish species from Kuwait's marine area. *Marine Pollution Bulletin*, 100 (2), 662–672. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.058>
- Ben Ameer, W., de Lapuente, J., El Megdiche, Y., Barhoumi, B., Trabelsi, S., Camps, & Borràs, M. 2012. Oxidative stress, genotoxicity and histopathology biomarker responses in mullet (*Mugil cephalus*) and sea bass (*Dicentrarchus labrax*) liver from Bizerte Lagoon (Tunisia). *Marine Pollution Bulletin*, 64 (2), 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.11.026>
- Bernet, D., Schmidt, H., Meier, W., Burkhardt-Holm, P., Wahli, T., Kueng, & Cáceres-Vélez, P. R. 1999. Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution. *Journal of Fish Diseases*, 22, 25–34. <https://doi.org/10.3354/dao061137>
- Bertrand, L., Asis, R., Monferrán, M. V., & Amé, M. V. 2016. Bioaccumulation and biochemical response in South American native species exposed to zinc: Boosted regression trees as novel tool for biomarkers selection. *Ecological Indicators*, 67, 769–778. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.048>
- Bertrand, L., Monferrán, M. V., Métais, I., Mouneyrac, C., & Amé, M. V. 2015. MTs in *Palaemonetes argentinus* as potential biomarkers of zinc contamination in freshwaters. *Ecological Indicators*, 48, 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.019>
- Bertrand, L., Monferrán, M. V., Mouneyrac, C., & Amé, M. V. 2018. Native crustacean species as a bioindicator of freshwater ecosystem pollution: A multivariate and integrative study of multi-biomarker response in active river monitoring. *Chemosphere*, 206, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.002>
- Bertrand, L., Monferrán, M. V., Mouneyrac, C., Bonansea, R. I., Asis, R., & Amé, M. V. 2016. Sensitive biomarker responses of the shrimp *Palaemonetes argentinus* exposed to chlorpyrifos at environmental concentrations: Roles of alpha-tocopherol and

- metallothioneins. *Aquatic Toxicology*, 179, 72–81.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.08.014>
- Bittarello, A. C., Vieira, J. C. S., Braga, C. P., de Paula Araújo, W. L., da Cunha Bataglioli, I., da Silva, J. M., & de Magalhães Padilha, P. 2019. Characterization of molecular biomarkers of mercury exposure to muscle tissue of *Plagioscion squamosissimus* and *Colossoma macropomum* from the Amazon region. *Food Chemistry*, 276 (March 2018), 247–254.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.002>
- Bouzahouane, H., Barour, C., Sleimi, N., & Ouali, K. 2018. Multi-biomarkers approach to the assessment of the southeastern Mediterranean Sea health status: Preliminary study on *Stramonita haemastoma* used as a bioindicator for metal contamination. *Chemosphere*, 207, 725–741.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.118>
- Cai, Y., Yin, Y., Li, Y., Guan, L., Zhang, P., Qin, Y. & Li, Y. 2020. Cadmium exposure affects growth performance, energy metabolism, and neuropeptide expression in *Carassius auratus gibelio*. *Fish Physiology and Biochemistry*, 46 (1), 187–197.  
<https://doi.org/10.1007/s10695-019-00709-3>
- Calado, S. L. de M., Santos, G. S., Vicentini, M., Bozza, D. C., Prodocimo, V., Magalhães, V. F. de, & Silva de Assis, H. C. 2020. Multiple biomarkers response in a Neotropical fish exposed to paralytic shellfish toxins (PSTs). *Chemosphere*, 238.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124616>
- Cappello, T., Brandão, F., Guilherme, S., Santos, M. A., Maisano, M., Mauceri, A., & Pereira, P. 2016. Insights into the mechanisms underlying mercury-induced oxidative stress in gills of wild fish (*Liza aurata*) combining 1H NMR metabolomics and conventional biochemical assays. *Science of the Total Environment*, 548–549, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.008>
- Carvalho Neta, R. N. F., Mota Andrade, T. de S. de O., de Oliveira, S. R. S., Torres Junior, A. R., da Silva Cardoso, W., Santos, D. M. S., & Brito,

- N. M. 2019. Biochemical and morphological responses in *Ucides cordatus* (Crustacea, Decapoda) as indicators of contamination status in mangroves and port areas from northern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (16), 15884–15893. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04849-0>
- Copat, C., Rizzo, M., Zuccaro, A., Grasso, A., Zuccarello, P., Fiore, M., & Ferrante, M. 2019. Metals / Metalloids and Oxidative Status Markers in Saltwater Fish from the Ionic Coast of Sicily, Mediterranean Sea. *International Journal of Environmental Research*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00237-1>
- Corredor-Santamaría, W., Torres-Tabares, A., & Velasco-Santamaría, Y. M. 2019. Biochemical and histological alterations in *Aequidens metae* (Pisces, Cichlidae) and *Astyanax gr. bimaculatus* (Pisces, Characidae) as indicators of river pollution. *Science of The Total Environment*, 692, 1234–1241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.187>
- da Silva Souza, T., Lacerda, D., Aguiar, L. L., Martins, M. N. C., & Augusto de Oliveira David, J. 2020. Toxic potential of sewage sludge: Histopathological effects on soil and aquatic bioindicators. *Ecological Indicators*, 111 (August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105980>
- Dane, H., & Şişman, T. 2017. A histopathological study on the freshwater fish species chub (*Squalius cephalus*) in the Karasu River, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 41, 1–11. <https://doi.org/10.3906/zoo-1509-21>
- Dane, H., & Şişman, T. 2020. A morpho-histopathological study in the digestive tract of three fish species influenced with heavy metal pollution. *Chemosphere*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125212>
- de Almeida Duarte, L. F., de Souza, C. A., Pereira, C. D. S., & Pinheiro, M. A. A. 2017. Metal toxicity assessment by sentinel species of mangroves: In situ case study integrating chemical and

- biomarkers analyses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.051>
- de Oliveira, F. G., Lirola, J. R., Salgado, L. D., de Marchi, G. H., Mela, M., Padial, A. A., & Silva de Assis, H. C. 2019. Toxicological effects of anthropogenic activities in *Geophagus brasiliensis* from a coastal river of southern Brazil: A biomarker approach. *Science of the Total Environment*, 667, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.168>
- Do, J. W., Saravanan, M., Nam, S. E., Lim, H. J., & Rhee, J. S. 2019. Waterborne manganese modulates immunity, biochemical, and antioxidant parameters in the blood of red seabream and black rockfish. *Fish and Shellfish Immunology*, 88, 546–555. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.03.020>
- Doherty, F. V., Adeola, A., Aneyo, I. A., & Otitolaju, A. A. 2019. Histopathological Biomarkers of exposure to Monocyclic Aromatic Hydrocarbons in *Clarias gariepinus* (African Catfish). *Journal of Science and Technology* Vol. 11 No. 1: 34-44.
- Dragun, Z., Filipović Marijić, V., Krasnići, N., Ramani, S., Valić, D., Rebok, K., & Erk, M. 2017. Malondialdehyde concentrations in the intestine and gills of Vardar chub (*Squalius vardarensis* Karaman) as indicator of lipid peroxidation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (20), 16917–16926. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9305-x>
- Elder, A., Nordberg, G. F., & Kleinman, M. (2022). Exposure, dose, and toxicokinetics of metals \*. In *Handbook on the Toxicology of Metals: Vol. I*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00025-5>
- El-Ghamdi, F. A., El-Kasheif, M. A., Gaber, H. S., & Ibrahim, S. A. 2014. Histopathological Alterations in Fish Organs as Potential and Direct Biomarkers of Pollution. *Catrina : The International Journal of Environmental Sciences*, 9: 25–31. <https://doi.org/10.12816/0010685>

- Etteieb, S., Tarhouni, J., & Isoda, H. 2019. Cellular stress response biomarkers for toxicity potential assessment of treated wastewater complex mixtures. *Water and Environment Journal*, 33 (1), 4–13. <https://doi.org/10.1111/wej.12361>
- Farombi, E. O., Adelowo, O. A., & Ajimoko, Y. R. 2007. Biomarkers of oxidative stress and heavy metal levels as indicators of environmental pollution in African cat fish (*Clarias gariepinus*) from Nigeria Ogun River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4 (2), 158–165. <https://doi.org/10.3390/ijerph2007040011>
- Ferreira, C. P., Lima, D., Paiva, R., Vilke, J. M., Mattos, J. J., Almeida, E. A., & Luchmann, K. H. 2019. Metal bioaccumulation, oxidative stress and antioxidant responses in oysters *Crassostrea gasar* transplanted to an estuary in southern Brazil. *Science of the Total Environment*, 685, 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.384>
- Gavrić, J., Despotović, S., Prokić, M., Gavrilović, B., Radovanović, T., Anđelković, M., & Saičić, Z. 2019. Do different diets affect oxidative stress biomarkers and metal bioaccumulation in two snake species? *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 223 (May), 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.05.010>
- Georgieva, E., Yancheva, V., Velcheva, I., Iliev, I., Vasileva, T., Bivolarski, V., & Stoyanova, S. 2016. Histological and biochemical changes in liver of common carp (*Cyprinus carpio* L.) under metal exposure. *North-Western Journal of Zoology*, 12 (2), 261–270.
- Ghisi, N. C., Oliveira, E. C., Guiloski, I. C., de Lima, S. B., Silva de Assis, H. C., Longhi, S. J., & Prioli, A. J. 2017. Multivariate and integrative approach to analyze multiple biomarkers in ecotoxicology: A field study in Neotropical region. *Science of the Total Environment*, 609, 1208–1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.266>
- Gomes, D. F., Moreira, R. A., Sanches, N. A. O., do Vale, C. A., Daam, M. A., Gorni, G. R., & Bastos, W. R. 2020) Dynamics of (total and methyl)

- mercury in sediment, fish, and crocodiles in an Amazonian Lake and risk assessment of fish consumption to the local population. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (2). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8066-z>
- Göteborg, Sweden Hernández, A. F., Gil, F., & Tsatsakis, A. M. 2014. Biomarkers of chemical mixture toxicity. *Biomarkers in Toxicology*, 655–669. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404630-6.00038-5>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7 (2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Javed, M., Ahmad, I., Usmani, N., & Ahmad, M. 2016. Studies on biomarkers of oxidative stress and associated genotoxicity and histopathology in *Channa punctatus* from heavy metal polluted canal. *Chemosphere*, 151, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.080>
- Javed, M., Ahmad, M. I., Usmani, N., & Ahmad, M. 2017. Multiple biomarker responses (serum biochemistry, oxidative stress, genotoxicity and histopathology) in *Channa punctatus* exposed to heavy metal loaded waste water /704/172/4081 /631/601 article. *Scientific Reports*, 7 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01749-6>
- Javed, M., & Usmani, N. 2017. An Overview of the Adverse Effects of Heavy Metal Contamination on Fish Health. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0875-7>
- Kaloyianni, M., Dimitriadi, A., Ovezik, M., Stamkopoulou, D., Feidantsis, K., Kastrinaki, G., & Bobori, D. 2020. Magnetite nanoparticles effects on adverse responses of aquatic and terrestrial animal models. *Journal of Hazardous Materials*, 383 (August 2019), 121204. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121204>
- Kim, J. H., Oh, C. W., & Kang, J. C. 2017. Antioxidant responses, neurotoxicity, and metallothionein gene expression in Juvenile

- Korean rockfish *Sebastes schlegelii* under dietary lead exposure. *Journal of Aquatic Animal Health*, 29 (2), 112–119. <https://doi.org/10.1080/08997659.2017.1307286>
- Kim, K. W., Sreeja, S. R., Kwon, M., Yu, Y. L., & Kim, M. K. 2020. Association of blood mercury level with the risk of depression according to fish intake level in the general Korean population: Findings from the Korean national health and nutrition examination survey (KNHANES) 2008–2013. *Nutrients*, 12 (1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/nu12010189>
- Kovacik, A., Tvrda, E., Miskeje, M., Arvay, J., Tomka, M., Zbynovska, K., & Massanyi, P. 2019. Trace Metals in the Freshwater Fish *Cyprinus carpio*: Effect to Serum Biochemistry and Oxidative Status Markers. *Biological Trace Element Research*, 188 (2), 494–507. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1415-x>
- Kumar, N., Krishnani, K. K., Meena, K. K., Gupta, S. K., & Singh, N. P. 2017. Oxidative and cellular metabolic stress of *Oreochromis mossambicus* as biomarkers indicators of trace element contaminants. *Chemosphere*, 171, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.066>
- Kumar, N., Krishnani, K. K., & Singh, N. P. 2019. Oxidative and Cellular Metabolic Stress of Fish: An Appealing Tool for Biomonitoring of Metal Contamination in the Kolkata Wetland, a Ramsar Site. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76 (3), 469–482. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-00587-5>
- Lacave, J. M., Bilbao, E., Gilliland, D., Mura, F., Dini, L., Cajaraville, M. P., & Orbea, A. 2020. Bioaccumulation, cellular and molecular effects in adult zebrafish after exposure to cadmium sulphide nanoparticles and to ionic cadmium. *Chemosphere*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124588>
- Lee, J. W., Choi, H., Hwang, U. K., Kang, J. C., Kang, Y. J., Kim, K. II, & Kim, J. H. 2019. Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A



- review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.010>
- Lionetto, M. G., Caricato, R., & Giordano, M. E. 2019. Pollution Biomarkers in Environmental and Human Biomonitoring. *The Open Biomarkers Journal*, 9 (1), 1–9. <https://doi.org/10.2174/1875318301909010001>
- Liu, J., Wang, E., Jing, W., Dahms, H., Murugan, K., & Wang, L. 2020. Mitigative effects of zinc on cadmium-induced reproductive toxicity in the male freshwater crab *Sinopotamon henanense*. *Environmental Science and Pollution Research* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08074-y>
- Louiz, I., Palluel, O., Ben-Attia, M., Aït-Aïssa, S., & Hassine, O. K. Ben. 2018. Liver histopathology and biochemical biomarkers in *Gobius niger* and *Zosterisessor ophiocephalus* from polluted and non-polluted Tunisian lagoons (Southern Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 128 (September 2017), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.028>
- Macirella, R., Guardia, A., Pellegrino, D., Bernabò, I., Tronci, V., Ebbesson, L. O. E., & Brunelli, E. 2016. Effects of two sublethal concentrations of mercury chloride on the morphology and metallothionein activity in the liver of zebrafish (*Danio rerio*). *International Journal of Molecular Sciences*, 17 (3). <https://doi.org/10.3390/ijms17030361>
- Marques, D. da S., Costa, P. G., Souza, G. M., Cardozo, J. G., Barcarolli, I. F., & Bianchini, A. 2019. Selection of biochemical and physiological parameters in the croaker *Micropogonias furnieri* as biomarkers of chemical contamination in estuaries using a generalized additive model (GAM). *Science of the Total Environment*, 647, 1456–1467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.049>
- Maulvault, A. L., Camacho, C., Barbosa, V., Alves, R., Anacleto, P., Pousão-Ferreira, P., & Diniz, M. S. 2019. Living in a multi-stressors environment: an integrated biomarker approach to assess the

- ecotoxicological response of meagre (*Argyrosomus regius*) to venlafaxine, warming and acidification. *Environmental Research*, 7–25. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.021>
- Mehana, E. S. E., Khafaga, A. F., Elblehi, S. S., Abd El-Hack, M. E., Naiel, M. A. E., Bin-Jumah, M., Othman, S. I., & Allam, A. A. (2020). Biomonitoring of heavy metal pollution using acanthocephalans parasite in ecosystem: An updated overview. *Animals*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/ani10050811>
- Naija, A., & Yalcin, H. C. (2023). Evaluation of cadmium and mercury on cardiovascular and neurological systems: Effects on humans and fish. *Toxicology Reports*, 10(April), 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.04.009>
- Nimet, J., Neves, M. P., Viana, N. P., de Arruda Amorim, J. P., & Delariva, R. L. 2020. Histopathological alterations in gills of a fish (*Astyanax bifasciatus*) in neotropical streams: negative effects of riparian forest reduction and presence of pesticides. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (1). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8030-y>
- Nofal, M. I., Zaki, V. H., & Ahmed, N. A. S. 2019. Effects of heavy metal pollution on *Nile tilapia* in Manzala farm : Oxidative stress biomarkers and histopathological findings. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*; 7 (5): 315-328(5), 315–328.
- Osman, A. G. M., Wuertz, S., & Mohammed-Geba, K. 2019. Lead-induced heat shock protein (HSP70) and metallothionein (MT) gene expression in the embryos of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). *Scientific African*, 3, e00056. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00056>
- Paschoalini, A. L., Savassi, L. A., Arantes, F. P., Rizzo, E., & Bazzoli, N. 2019. Heavy metals accumulation and endocrine disruption in *Prochilodus argenteus* from a polluted neotropical river. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169 (September 2018), 539–550. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.047>

- Paul, D. 2017. Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*, 15 (2), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.001>
- Pérez, M. R., Rossi, A. S., Bacchetta, C., Elorriaga, Y., Carriquiriborde, P., & Cazenave, J. 2018. In situ evaluation of the toxicological impact of a wastewater effluent on the fish *Prochilodus lineatus*: biochemical and histological assessment. *Ecological Indicators*, 84 (April 2017), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.004>
- Rajeshkumar, S., & Li, X. 2018. Bioaccumulation of heavy metals in fish species from the Meiliang Bay, Taihu Lake, China. *Toxicology Reports*, 5 (September 2017), 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.01.007>
- Rani, R., Sharma, P., Kumar, R., & Hajam, Y. A. (2022). Chapter 3. Effects of heavy metals and pesticides on fish. In *Bacterial Fish Diseases* (Vol. 3). INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85624-9.00016-6>
- Rautenberg, G. E., Amé, M. V., Monferrán, M. V., Bonansea, R. I., & Hued, A. C. 2015. A multi-level approach using *Gambusia affinis* as a bioindicator of environmental pollution in the middle-lower basin of Suquia River. *Ecological Indicators*, 48, 706–720. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.025>
- Roméo, M., Bennani, N., Gnassia-Barelli, M., Lafaurie, M., & Girard, J. P. 2000. Cadmium and copper display different responses towards oxidative stress in the kidney of the sea bass *Dicentrarchus labrax*. *Aquatic Toxicology*, 48 (2–3), 185–194. [https://doi.org/10.1016/S0166-445X\(99\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0166-445X(99)00039-9)
- Salgado, L. D., Marques, A. E. M. L., Kramer, R. D., Oliveira, F. G. de, Moretto, S. L., Lima, B. A. de, & Silva de Assis, H. C. 2019. Integrated assessment of sediment contaminant levels and biological responses in sentinel fish species *Atherinella brasiliensis* from a sub-tropical estuary in south Atlantic. *Chemosphere*, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.204>

- Sayadi, M. H., Mansouri, B., Shahri, E., Tyler, C. R., Shekari, H., & Kharkan, J. 2020. Exposure effects of iron oxide nanoparticles and iron salts in blackfish (*Capoeta fusca*): Acute toxicity, bioaccumulation, depuration, and tissue histopathology. *Chemosphere*, *247*, 125900. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125900>
- Sevcikova, M., Modra, H., Slaninova, A., & Svobodová, Z. 2011. Metals as a cause of oxidative stress in fish: a review. *Veterinarni Medicina*, *56* (11), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.06.018>
- Shekh, K., Tang, S., Kodzhahinchev, V., Niyogi, S., & Hecker, M. 2019. Species and life-stage specific differences in cadmium accumulation and cadmium induced oxidative stress, metallothionein and heat shock protein responses in white sturgeon and rainbow trout. *Science of the Total Environment*, *673*, 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.083>
- Sia Su, G. L., Ramos, G. B., & Sia Su, M. L. L. 2013. Bioaccumulation and histopathological alteration of total lead in selected fishes from Manila Bay, Philippines. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *20* (4), 353–355. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.03.003>
- Singh, M., Barman, A. S., Devi, A. L., Devi, A. G., & Pandey, P. K. 2019. Iron mediated hematological, oxidative and histological alterations in freshwater fish *Labeo rohita*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *170* (September 2018), 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.129>
- Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., & Gupta, R. 2011. Heavy metals and living systems: An overview. *Indian Journal of Pharmacology*, *43* (3), 246–253. <https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>
- Swaleh, S. B., Banday, U. Z., & Usmani, N. 2019. Comparative study of biochemical, histological and molecular biomarkers of heavy metal contamination in *Cyprinus carpio* collected from warm-monomictic lake and government culture pond. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.152>
- Sweidan, A. H., El-Bendary, N., Hegazy, O. M., Hassanien, A. E., & Snasel, V. 2015. Water Pollution Detection System Based on Fish Gills as a

- Biomarker. *Procedia Computer Science*, 65, 601–611.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.004>
- Telahigue, K., Rabeh, I., Hajji, T., Trabelsi, W., Bejaoui, S., Chouba, L., & Soudani, N. 2019. Effects of acute mercury exposure on fatty acid composition and oxidative stress biomarkers in *Holothuria forskali* body wall. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169 (November 2018), 516–522.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.051>
- Uluturhan, E., Darılmaz, E., Kontas, A., Bilgin, M., Alyuruk, H., Altay, O., & Sevgi, S. 2019. Seasonal variations of multi-biomarker responses to metals and pesticides pollution in *M. galloprovincialis* and *T. decussatus* from Homa Lagoon, Eastern Aegean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 141 (November 2018), 176–186.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.035>
- Van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. E. 2003. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, Vol. 13, pp. 57–149.  
[https://doi.org/10.1016/S1382-6689\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S1382-6689(02)00126-6)
- Vieira, C. E. D., Costa, P. G., Cabrera, L. C., Primel, E. G., Fillmann, G., Bianchini, A., & Bueno dos Reis Martinez, C. 2017. A comparative approach using biomarkers in feral and caged Neotropical fish: Implications for biomonitoring freshwater ecosystems in agricultural areas. *Science of the Total Environment*, 586, 598–609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.026>
- Vieira, C. E. D., Costa, P. G., Caldas, S. S., Tesser, M. E., Risso, W. E., Escarrone, A. L. V., & dos Reis Martinez, C. B. 2019. An integrated approach in subtropical agro-ecosystems: Active biomonitoring, environmental contaminants, bioaccumulation, and multiple biomarkers in fish. *Science of the Total Environment*, 666, 508–524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.209>
- Vieira, J. C. S., Cavecci, B., Queiroz, J. V., Braga, C. P., Padilha, C. C. F., Leite, A. L., & Padilha, P. M. 2015. Determination of the Mercury

- Fraction Linked to Protein of Muscle and Liver Tissue of Tucunaré (*Cichla spp.*) from the Amazon Region of Brazil. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69 (4), 422–430. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0160-9>
- Waheed, R., El Asely, A. M., Bakery, H., El-Shawarby, R., Abuo-Salem, M., Abdel-Aleem, N., & Abdeen, A. 2020. Thermal stress accelerates mercury chloride toxicity in *Oreochromis niloticus* via up-regulation of mercury bioaccumulation and HSP70 mRNA expression. In *Science of the Total Environment* (Vol. 718). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137326>
- Wang, J., Zhang, H., Zhang, T., Zhang, R., Liu, R., & Chen, Y. 2015. Molecular mechanism on cadmium-induced activity changes of catalase and superoxide dismutase. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.02.037>
- Weber, A. A., Sales, C. F., de Souza Faria, F., Melo, R. M. C., Bazzoli, N., & Rizzo, E. 2020. Effects of metal contamination on liver in two fish species from a highly impacted neotropical river: A case study of the Fundão dam, Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190 (October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110165>
- Weber, P., Behr, E. R., Knorr, C. D. L., Vendruscolo, D. S., Flores, E. M. M., Dressler, V. L., & Baldisserotto, B. 2013. Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river. *Microchemical Journal*, 106, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.004>
- Yi, Yujun, Tang, C., Yi, T., Yang, Z., & Zhang, S. 2017. Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145 (January), 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.022>
- Yi, Yujun, Yang, Z., & Zhang, S. 2011). Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy

- metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environmental Pollution*, 159 (10), 2575–2585. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.011>
- Yin, Y., Zhang, P., Yue, X., Du, X., Li, W., Yin, Y., & Li, Y. 2018. Effect of sub-chronic exposure to lead (Pb) and *Bacillus subtilis* on *Carassius auratus gibelio*: Bioaccumulation, antioxidant responses and immune responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161 (June), 755–762. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.056>
- Yuan, S. S., Lv, Z. M., Zhu, A. Y., Zheng, J. L., & Wu, C. W. 2017. Negative effect of chronic cadmium exposure on growth, histology, ultrastructure, antioxidant and innate immune responses in the liver of zebrafish: Preventive role of blue light emitting diodes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139 (January), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.021>
- Zafar, N., & Khan, M. A. 2020. Effects of dietary iron on growth, haematology, oxidative stress and hepatic ascorbic acid concentration of stinging catfish *Heteropneustes fossilis*. *Aquaculture*, 516 (May), 734642. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734642>
- Zhang, Zaiwang, Pei, N., Sun, Y., Li, J., Li, X., Yu, S., & Mai, B. 2019. Halogenated organic pollutants in sediments and organisms from mangrove wetlands of the Jiulong River Estuary, South China. *Environmental Research*, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.028>
- Zhang, Ziwei, Zheng, Z., Cai, J., Liu, Q., Yang, J., Gong, Y., & Xu, S. 2017. Effect of cadmium on oxidative stress and immune function of common carp (*Cyprinus carpio* L.) by transcriptome analysis. *Aquatic Toxicology*, 192, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.09.022>
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. 2008. Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606 (2), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>





## Glosarium

---

### 20 tropogenik:

Istilah antropogenik (*anthropogenic*) bisa kita maknai secara sederhana sebagai aktivitas manusia baik sengaja maupun tidak sengaja dan dilakukan secara terus-menerus yang memberikan dampak buruk bagi masyarakat karena memicu atau mempercepat terjadinya bencana

### 11 kau:

**Bakau** (*Rhizophora*) adalah nama sekelompok tumbuhan dari genus *Rhizophora*, suku Rhizophoraceae. Tumbuhan ini memiliki ciri-ciri yang mencolok berupa akar tunjang yang besar dan berkayu, pucuk yang tertutup daun penumpu yang meruncing, serta buah yang berkecambah serta berakar ketika masih di pohon (*vivipar*).

### Batch:

Menurut Collins Dictionary, batch adalah kuantitas atau nomor <sup>109</sup> datang pada satu waktu atau diambil bersama-sama. Jadi, penggunaan batch ini kerap digunakan sebagai sekumpulan orang atau hal yang dianggap sebagai kelompok.

### 50 Bioakumulasi:

Bioakumulasi adalah terjadinya penimbunan substansi atau zat tertentu di dalam tubuh suatu organisme.

### 18 Biomagnifikasi:

Biomagnifikasi adalah akumulasi atau peningkatan zat berbahaya dalam rantai makanan dengan konsentrasi tertinggi pada predator.

**Biomonitoring:**

**Biomonitoring** merupakan kajian pemantauan kualitas lingkungan menggunakan organisme. Monitoring secara biologis terhadap toksikan di alam sangat dinamis terhadap waktu dan tempat

**Biota:**

**Biota** adalah keseluruhan kehidupan/ makhluk hidup yang ada pada satu wilayah geografi tertentu dalam suatu waktu tertentu

**Blanko:**

Larutan *blanko* adalah larutan tidak berisi analit atau larutan tanpa sampel. Titrasi blanko biasanya dilakukan untuk tujuan kalibrasi sebagai larutan pembanding.

**Bobot Bukti (Weight of Evidence/ WoE):**

Bobot bukti adalah metode kuantitatif untuk menggabungkan bukti untuk mendukung hipotesis.

**Efek sublethal:**

Dampak subletal merupakan dampak biologis, fisiologis atau perilaku pada organisme akibat paparan zat yang berbahaya

**Ekosistem:**

Ekosistem adalah suatu sistem yang terdiri dari organisme hidup (biotik) dan lingkungan fisik (abiotik) yang saling berinteraksi di dalam suatu wilayah tertentu, yang melibatkan hubungan kompleks antara organisme hidup satu sama lain dan dengan lingkungan mereka, termasuk faktor-faktor seperti iklim, tanah, air, sinar matahari, dan interaksi ekologis.

**Ekosistem estuaria:**

Ekosistem Estuaria merupakan suatu mintakat peralihan (zona transisi) antara lingkungan sungai dengan lingkungan laut. Dengan demikian, dipengaruhi baik oleh karakter sungai yang membentuknya (misalnya banyaknya air tawar dan sedimentasi yang dibawanya), dan oleh karakter

laut di sisi yang lain (misalnya pasang surut, pola gelombang, kadar garam, serta arus laut)

**Ekotoksikologi:**

19

Ekotoksikologi adalah ilmu yang mempelajari racun kimia dan fisik pada makhluk hidup, khususnya populasi dan komunitas termasuk ekosistem, termasuk jalan masuknya agen dan interaksi dengan lingkungan.

**Epitelium:**

32

Jaringan epitel adalah lapisan besar sel yang menutupi semua permukaan tubuh yang terpapar lingkungan eksternal dan juga melapisi rongga tubuh internal.

**Faring:**

Faring adalah saluran penghubung yang menyalurkan udara dari hidung ke dalam trakea untuk kemudian dibawa ke paru-paru

**Gradien salinitas:**

Kekuatan gradien salinitas adalah energi yang tercipta dari perbedaan konsentrasi garam antara dua fluida, biasanya air tawar dan air asin

**Hematopoiesis:**

14

Hemopoiesis atau sering juga dikenal dengan hematopoiesis adalah peristiwa pembuatan sel darah merah dan sel darah putih, termasuk plasma darah.

**Hidrodinamika:**

54

Cabang ilmu yang membahas tentang energi atau perubahan energi dari suatu fluida yang mengalir

**Hierarki tropik:**

Tingkat trofik adalah cara hierarki untuk mengklasifikasikan organisme berdasarkan hubungan makannya dalam suatu ekosistem

**Indikator:**

48

**Indikator** adalah sesuatu yang dapat memberikan petunjuk atau keterangan. **Indikator** juga dapat menjadi acuan dalam menilai suatu

Interdisipliner:

29

Interdisipliner adalah interaksi intensif antarsatu atau lebih disiplin (multidisiplin), baik yang langsung atau pun tidak berhubungan, melalui berbagai penelitian, dengan tujuan melakukan integrasi konsep, metode, dan analisis.

Jaring makanan:

33

Jejaring makanan adalah kumpulan dari rantai makanan, yang tumpang tindih tetapi saling berhubungan di ekosistem sehingga membentuk semacam jaring.

Kaskade tropik:

Kaskade trofik, sebuah fenomena ekologi yang dipicu oleh penambahan atau penghilangan puncakpredator dan melibatkan perubahan timbal balik dalam populasi relatif predator dan mangsa melalui rantai makanan, yang sering kali mengakibatkan perubahan dramatis dalam struktur ekosistem dan siklus nutrisi.

Kemoreseptor:

Kemoreseptor adalah sel saraf khusus yang mendeteksi perubahan komposisi kimia darah dan mengirimkan informasi ke otak untuk mengatur fungsi kardiovaskular dan pernapasan.

Kontaminan:

Kontaminan adalah zat yang tidak sengaja masuk/ ditambahkan ke dalam makanan/ media. Zat-zat ini mungkin terdapat dalam makanan/ media sebagai akibat dari berbagai tahap produksi, pengemasan, pengangkutan atau penyimpanan, atau disebabkan oleh pencemaran lingkungan.

Koridor migrasi:

Koridor migrasi berarti rute yang biasanya dilalui hewan antar habitat musiman.

23

Krustasea:

Krustasea atau Udang-udangan adalah suatu kelompok besar dari artropoda, terdiri dari kurang lebih 52.000 spesies yang terdeskripsikan, dan biasanya dianggap sebagai suatu subfilum

Logam berat:

18

Logam berat adalah logam yang memiliki kerapatan, berat atom, atau nomor atomnya relatif tinggi dan mempunyai berat jenis (densitas) di atas 5 kg/dm<sup>3</sup> dan biasanya, memiliki nomor atom yang lebih besar dari 20.

Lumen gastrointestinal:

Saluran gastrointestinal (GI) atau usus, saluran pencernaan makanan adalah tabung satu arah yang panjangnya sekitar 7,62 meter (25 kaki) selama hidup dan panjangnya mendekati 10,67 meter (35 kaki) bila diukur setelah kematian, setelah tonus otot polos hilang.

Mekanoreseptor:

Reseptor yang menerima rangsang mekanik.

12

Machine learning:

Machine learning (ML) adalah mesin yang dikembangkan untuk bisa belajar dengan sendirinya tanpa arahan dari penggunanya, yang dikembangkan berdasarkan disiplin ilmu lainnya seperti statistika, matematika dan data mining sehingga mesin dapat belajar dengan menganalisa data tanpa perlu di program ulang atau diperintah.

4

#### Metallothionein:

Metallothionein adalah protein yang kaya akan asam amino sistein yang memiliki kemampuan untuk mengikat ion logam berat.

17

#### Metode probabilistik:

adalah metode dimana setiap contoh/ sampel dipilih dengan memastikan bahwa peluang terpilih harus sama. Cara non-probabilistik adalah metode dimana tidak ada cara untuk mengetahui peluang terpilihnya contoh tertentu, apalagi untuk memastikan bahwa semua contoh memiliki peluang yang sama.

8

#### Moluska:

Moluska (Mollusca, dari bahasa Latin: molluscus = lunak), hewan triploblastik selomata yang bertubuh lunak, termasuk semua hewan lunak dengan maupun tanpa cangkang, seperti berbagai jenis siput, kiton, kerang-kerangan, serta cumi-cumi dan kerabatnya. Saat ini diperkirakan ada 75 ribu jenis, ditambah 35 ribu jenis dalam bentuk fosil, merupakan filum terbesar kedua dalam kerajaan Binatang, setelah filum Arthropoda, hidupnya menyebar di laut, air tawar, payau, dan darat. Dari palung benua di lautan sampai pegunungan yang tinggi.

#### Muara:

Muara dan lahan basah di sekitarnya merupakan perairan yang biasanya ditemukan di pertemuan sungai dengan laut. Muara adalah salah satu ekosistem paling produktif di dunia, dan ekosistem yang rumit.

#### Mukosilar:

Pembersihan mukosiliar ( MCC ), transportasi mukosiliar , atau eskalator mukosiliar , menggambarkan mekanisme pembersihan diri pada saluran udara dalam sistem pernapasan.

Multi-spesies:

Pengelolaan multi-spesies (MSM) menetapkan pengembangan penilaian dan operasi yang seimbang secara ekologis dalam melindungi satwa liar, termasuk ikan.

Nekrosa:

55

Nekrosis:

Nekrosis adalah kondisi di mana sel-sel tubuh mengalami kerusakan, kematian baik sel maupun jaringan dalam tubuh manusia.

Neurologis:

Pembahasan yang berhubungan dengan sistem saraf manusia.

Neurotoksisitas:

45

Neurotoksisitas adalah rusaknya bagian otak yang diakibatkan oleh bahan yang bersifat toksik salah satunya pestisida, terjadi ketika paparan zat beracun alami atau buatan manusia (neurotoksikan) mengubah aktivitas normal sistem saraf.

Predator:

8

Pemangsa atau predator adalah segala jenis hewan yang memiliki kebiasaan memakan hewan lain

Produktivitas primer:

28

Produktivitas primer adalah laju produksi karbon organik per satuan waktu, yang merupakan hasil perubahan energi matahari oleh tumbuhan hijau menjadi energi kimia melalui fotosintesis.

52

Remediasi:

Remediasi adalah proses pemulihan dari kondisi terkontaminasi cemaran menjadi kondisi acuan.

Route migrasi:

Rute geografis yang dilalui para migran (manusia dan hewan) untuk berpindah/ mengungsi melalui titik- titik penghubung di daerah transit dari wilayah asal mereka ke lainnya.

Siklus geokimia:

40 Daur Biogeokimia merupakan perpindahan unsur-unsur kimia melalui makhluk hidup dan lingkungan abiotik (tanah dan air).

Spektrometri Massa Plasma Tergabung (ICP-MS):

10 sistem alat ukur multi unsur yang telah luas pemakaiannya dalam bidang kimia analitik, dapat mendeteksi unsur pada tingkat konsentrasi pg/ml dalam waktu beberapa menit per sampel tanpa memerlukan proses pemekatan dan pemisahan kimia yang panjang.

Spektroskopi Penyerapan atom (AAS):

14 Spektrofotometri Serapan Atom (AAS) adalah suatu metode analisis yang didasarkan pada proses penyerapan energi radiasi oleh atom-atom yang berada pada tingkat energi dasar (ground state).

Spektroskopi Penyerapan Sinar -XXRF (X-Ray Fluorescence ):

Spektroskopi serapan sinar-X (XAS) adalah teknik yang banyak digunakan untuk menentukan struktur geometris dan/atau elektronik lokal suatu materi

Status ekologi:

Status ekologi merupakan penilaian terhadap kualitas struktur dan fungsi ekosistem air permukaan.

22 Stress oksidatif:

Stres oksidatif adalah fenomena yang disebabkan oleh ketidakseimbangan antara produksi dan akumulasi spesies oksigen reaktif



(ROS) dalam sel dan jaringan serta kemampuan sistem biologis untuk mendetoksifikasi produk reaktif tersebut.

Transfer tropik:

Perpindahan trofik/ makanan yang mengandung logam berat dalam rantai makanan juga dapat berkontribusi pada transportasi jarak jauh elemen-elemen ini di lingkungan. Produsen primer sangat penting dalam transfer trofik logam berat karena mereka menjembatani fluks logam antara komponen abiotik dan biotik di dalam ekosistem.

## INDEKS

---

### A

Antropogenik, 115

### B

Bakau, 115

Batch, 115

Bioakumulasi, 4, 5, 13, 20, 22, 52, 53,  
59, 68, 115

Biomagnifikasi, 20, 21, 50, 64, 115

Biomonitoring, i, iii, vii, 5, 13, 38, 61,  
106, 107, 108, 113, 116

Biota, 116, 130

Blanko, 45, 116

### E

Efek sublethal, 116

Ekosistem, 1, 2, 6, 29, 70, 90, 95, 116,  
129

Ekosistem estuaria, 29, 70, 90, 116

Ekotoksikologi, 14, 117, 129

Epitelium, 117

### F

Faring, 117

### G

Gradien salinitas, 11, 31, 117

### H

Hematopoesis, 117

Hidrodinamika, 11, 117

### I

Indikator, 117, 118

### J

Jaring makanan, 118

### K

Kaskade tropik, 118

Kemoreseptor, 118

Kontaminan, 5, 6, 29, 57, 77, 118

Koridor migrasi, 118, 119

Krustasea, 119

### L

Logam berat, 11, 12, 17, 19, 21, 24, 34,  
49, 59, 63, 67, 68, 70, 80, 119

Lumen gastrointestinal, 119

### M

Machine learning, 119

Mekanoreseptor, 119

Metallothionein, 33, 100, 120

Metode probabilistik, 120

Moluska, 120

Muara, i, iii, vii, 1, 2, 3, 6, 27, 29, 30, 36,  
39, 49, 54, 63, 87, 88, 95, 120

Mukosilar, 120

Multi-species, 121

**N**

Nekrosa, 121  
Nekrosis, 121  
Neurologis, 121  
Neurotoksisitas, 121

**P**

Predator, 50, 121

**R**

Remediasi, 75, 121

Route migrasi, 122

**S**

Siklus geokimia, 122  
Status ekologi, 122  
Stress oksidatif, 122

**T**

Transfer tropik, 123

## PROFIL PENULIS

---



**Krisdianto** dilahirkan di Banjarmasin, 63 tahun yang lalu, dan dibesarkan di kota ini. Pendidikan dasar dan menengah diselesaikan di kota Banjarbaru, 35 km di sebelah Timur kota Banjarmasin. Setelah menyelesaikan (Sekolah Lanjutan Tingkat Atas (SLTA), penulis, melalui Proyek Perintis II (PP II) melanjutkan studi di TPB ITB pada tahun 1981, dan memilih Jurusan Biologi, Fakultas MIPA pada 1982.

Pada tahun 1993, penulis melanjutkan studi magister ke Napier University of Edinburgh, UK di Biological Water Resource Management. Selanjutnya penulis menyelesaikan Pendidikan Doctoral di Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya Malang, dalam bidang minat Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, pada tahun 2013.

Penulis bekerja di Universitas Lambung Mangkurat sejak tahun 1988 di tugaskan sebagai dosen di Jurusan Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan, dan sejak tahun 2002 dipindahkan ke Prodi Biologi, Fmipa Universitas Lambung Mangkurat. Sampai saat ini mengajar dan meneliti di core bidang ekologi. Peneliti mengajar untuk S1 dalam mata kuliah, Ekologi Dasar, Ekologi Urban dan Industri, Ekologi Kalimantan, Restorasi Ekosistem dan Lanskap, Ekologi Lanjut, Pengenalan Lingkungan Lahan Basah, Metode Penelitian, Pengantar Lingkungan Lahan Basah, Konservasi dan Pengelolaan Sumberdaya Hayati. Penulis juga sebagai pengajar mata kuliah Ekologi Lahan Basah, dan Ekologi dan Ekosistem Lahan Basah, Rekayasa Ekologi dan Restorasi Ekosistem Lahan Basah di Program Studi Ilmu Lingkungan (S3).

Penulis banyak melakukan kegiatan penelitian berbasis petak untuk mendukung kegiatan Pengabdian dalam rangka mendukung Pemberdayaan Masyarakat Lokal. Penelitian tentang pemanfaatan jasa ekosistem lahan basah terkait dengan kegiatan ethno- konservasi, kearifan dan keunggulan komparatif lokal. Pengabdian masyarakat dilakukan untuk terlibat dalam pemberdayaan masyarakat lokal dan Mitra

Binaan, dengan memanfaatkan kearifan lokal, dan teknologi sederhana, untuk ketahanan pangan, iklim, konservasi dan sustainability. Beberapa artikel ilmiah telah diterbitkan berbagai proseedng Seminar dan Konfrensi Nasional dan Internasional. Buku Pendukung perkuliahan yang pernah ditulis, seperti; “Distribusi dan Jasa Lahan Basah” dan “Bioekologi dan Reproduksi Ikan Betok (*Anabas testudineus* Bloch 1792) Di Rawa Monoton”

Penulis menginisiasi upaya Revitalisasi Laboratorium Kualitas Air PDAM Intan Banjar, Restorasi Hutan Pinus dalam konsep CPUL (*Continuous Productive Urban Landscape*), Revitalisasi layanan Air Bersih untuk Banjarbakula. Hasilnya berupa layanan air bersih kini telah dapat dirasakan oleh masyarakat di Kota Banjarbaru, secara khusus beberapa mahasiswa Prodi Biologi kini telah menjadi kedua perusahaan tersebut.



**Heri Budi Santoso** lahir di Pati Jawa Tengah pada tanggal 11 September 1969. Penulis menyelesaikan SDN, SMPN, SMAN di Pati. Selepas SMA, penulis melanjutkan kuliah di Jurusan Zoologi Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) Purwokerto. Usai meraih gelar sarjana biologi pada tahun 1992, penulis sebagai penerima beasiswa tunjangan ikatan dinas (TID) ditugaskan sebagai dosen pada tahun 1994 di Fakultas Kedokteran Universitas Lambung Mangkurat (ULM) Banjarbaru Kalimantan Selatan. Pada tahun 1998 penulis lulus Magister Biologi dengan bidang minat Struktur dan Perkembangan Hewan dari UGM Yogyakarta. Pada tahun 2000 penulis dipindah tugaskan sebagai dosen di Program Studi Biologi FMIPA ULM Banjarbaru sampai sekarang dengan mengampu mata kuliah Bioindikator, Struktur dan Perkembangan Hewan, Sains dan Teknologi Hewan, Mikroteknik, Biologi Umum serta Fauna Kalimantan. Mulai tahun akademik 2019, penulis melanjutkan studi S3 Ilmu Pertanian di ULM dengan minat Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan dan tamat pada Oktober 2022. Dalam sepuluh tahun terakhir, penulis fokus riset tentang potensi ikan sebagai bioindikator

pencemaran dan sudah menghasilkan beberapa artikel ilmiah yang dipublikasikan <sup>79</sup> pada jurnal internasional bereputasi. Buku yang pernah ditulis adalah **Ikan gelodok sebagai bioindikator pencemaran logam berat (serial fauna kalimantan)** (ISBN 9786020950754 Penerbit Scripta Cendekia), **Dasar-Dasar Struktur Hewan** (ISBN 9786233723480 Penerbit Rajawali Pers PT Raja Grafindo Persada), dan **Dasar-Dasar Perkembangan Hewan** (ISBN 9786233750257 Penerbit IRDH).

Berbagai jabatan pernah diemban oleh penulis, yaitu sebagai Koordinator Pendidikan (Kordik) pada Bagian Biologi Kedokteran Fakultas Kedokteran ULM (1999-2000), Ketua Program Studi Biologi FMIPA ULM (2000-2002), Wakil Dekan bidang Akademik FMIPA ULM (2002-2010), dan Dekan FMIPA ULM (2010-2018).

Penulis pernah mengikuti training manajemen perguruan tinggi yaitu *Short Course on University Management, Research and Commercialisation Dehatied* selama dua minggu di New Castle University Australia (2015). Pada tahun 2016 mengikuti training *Learning Program on Strategic Leadership and Governance for Academic and Administrative Leaders* di SEAMEO INNOTECH, Diliman, Quezon City, Philippines. Pada tahun 2018, Penulis menginisiasi kerjasama 3 institusi dalam upaya konservasi bekantan fauna endemik Kalimantan, yaitu kerjasama riset antara FMIPA ULM-Yayasan Sahabat Bekantan Indonesia-Fakultas Kedokteran Hewan UGM, saat itu seremonial penandatanganan naskah kerjasama dihadiri oleh Gubernur Kalimantan Selatan, Rektor ULM dan Kepala BKSDA Kalsel.



**Rizmi Yunita** lahir di Banjarmasin pada tanggal 05 Juni 1965, anak pertama dari 4 bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan SDN Kebun Bunga Banjarmasin. SMPN 2 Seroja Banjarmasin, SMAN 2 Banjarmasin, menyelesaikan kuliah S1 di Fakultas Perikanan dan Kelautan ULM tahun 1989. Tahun 1991 diterima sebagai dosen di Fakultas Perikanan dan Kelautan ULM dan melanjutkan kuliah program magister di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Bandung (FMIPA-ITB) pada bidang khusus ekologi/Biologi masuk tahun 1996 dan selesai studi S2 tahun 1998. Tahun 2010 melanjutkan studi pada Program Doktor Ilmu Lingkungan di Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya (UB) dengan minat Pengelolaan Sumber Daya Air dan Lingkungan, menyelesaikan studi tahun 2014 memperoleh penghargaan Prestasi Akademik Wisudawan Terbaik 1 Program Doktor (S3) Ilmu Pertanian UB dengan predikat pujian.

Penulis sampai sekarang aktif sebagai pengajar pada mata kuliah S1 yaitu Iktiologi, Avertebrata air, Biologi Perikanan, Fisiologi Hewan Air, Pengkajian Stok Ikan, Ekotoksikologi Perairan, Tumbuhan Air, Manajemen Ekosistem Waduk. Penulis aktif mengajar pada program Magister Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan dengan mengampu mata kuliah Pengelolaan Sumberdaya Perairan, Inventarisasi Sumberdaya Alam dan Pemetaan Lingkungan, Bioremediasi Tanah dan Air Tercemar, Rehabilitasi Lahan Bermasalah. Penulis aktif mengajar pada Program Studi Doktor (S3) Ilmu Pertanian ULM dengan mata kuliah Bioekologi Perairan Tawar dan Pesisir, Sistem Ekologi Lahan Basah, Sumberdaya Lahan Basah dan Kerawanannya, selain sebagai pengajar penulis aktif membimbing skripsi, tesis dan disertasi.

Penulis aktif meneliti dan publikasi jurnal secara nasional dan internasional. Kerjasama penelitian di berbagai instansi pemerintah daerah yang berkaitan dengan lingkungan dilakukan di wilayah Kalimantan Selatan. Jabatan profesional diluar Institusi penulis aktif pada Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Banjar sebagai Tim Ahli Bidang

Lingkungan Hidup ditunjuk dengan SK. Bupati Kabupaten Banjar sebagai Tenaga Ahli Bidang Biota Perairan mulai tahun 2016 sampai sekarang.

Pengalaman manajemen dilingkungan ULM, penulis pernah ditunjuk sebagai Sekretaris Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Ketua Laboratorium Iktiologi (2009 – 2022) pada S1. Pada program magister (S2) dipercayakan sebagai Kabid. Keuangan dan Administrasi Prodi. Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Program Pascasarjana ULM, pada program Doktor (S3) dipercayakan sebagai sekretaris Program Studi Doktor (S3) Ilmu Pertanian ULM (2017-2021).



# Biomonitoring *Logam Berat*

di Muara Sungai Menggunakan  
Ikan Sebagai Bioindikator

Lingkungan estuaria memainkan peran penting dalam mendukung beragam flora dan fauna, memberikan manfaat ekologis yang penting dan berfungsi sebagai penghubung antara ekosistem darat dan laut. Namun, aktivitas antropogenik telah menyebabkan pelepasan logam berat ke dalam ekosistem yang rapuh ini, dengan konsekuensi yang merugikan bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Sangatlah penting bagi kita untuk menggunakan strategi *biomonitoring* yang efektif untuk menilai tingkat pencemaran logam berat dan implikasinya terhadap kehidupan akuatik dan masyarakat manusia.

Buku *Biomonitoring Logam Berat di Muara Sungai Menggunakan Ikan Sebagai Bioindikator* ini bertujuan untuk menjadi sumber referensi yang berharga bagi para mahasiswa, peneliti, manajer lingkungan, dan pembuat kebijakan yang terlibat dalam bidang ekologi, ekologi air, ekotoksikologi, kimia, dan biologi ikan. Buku ini akan memberikan penjelasan yang sistematis dan kohesif mengenai metodologi, studi kasus, dan wawasan ilmiah terkini terkait penggunaan ikan sebagai bioindikator untuk *biomonitoring* logam berat di muara.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)  
Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581  
Telp/Fax : (0274) 4533427  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
cs@deepublish.co.id  
Penerbit Deepublish  
@penerbitbuku\_deepublish  
www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Biologi

ISBN 978-623-02-7494-7



9 786230 274947

# e-book-Biomonitoring Logam Berat\_v.2.0\_Unesco\_FULL\_ISBN

## ORIGINALITY REPORT

9%

SIMILARITY INDEX

8%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1	<a href="http://deepublishstore.com">deepublishstore.com</a> Internet Source	1%
2	<a href="http://repository.iainambon.ac.id">repository.iainambon.ac.id</a> Internet Source	1%
3	<a href="http://repository.um-palembang.ac.id">repository.um-palembang.ac.id</a> Internet Source	1%
4	<a href="http://repository.ub.ac.id">repository.ub.ac.id</a> Internet Source	<1%
5	<a href="http://unlam.ac.id">unlam.ac.id</a> Internet Source	<1%
6	<a href="http://repository.upnjatim.ac.id">repository.upnjatim.ac.id</a> Internet Source	<1%
7	<a href="http://www.sonora.id">www.sonora.id</a> Internet Source	<1%
8	<a href="http://id.wikipedia.org">id.wikipedia.org</a> Internet Source	<1%
9	<a href="http://rdiyant.blogspot.com">rdiyant.blogspot.com</a> Internet Source	<1%
10	<a href="http://repository.unpas.ac.id">repository.unpas.ac.id</a> Internet Source	<1%

<1 %

11

[p2k.stekom.ac.id](http://p2k.stekom.ac.id)

Internet Source

<1 %

12

Submitted to President University

Student Paper

<1 %

13

[lib.unnes.ac.id](http://lib.unnes.ac.id)

Internet Source

<1 %

14

Submitted to Universitas Islam Indonesia

Student Paper

<1 %

15

[repository.warmadewa.ac.id](http://repository.warmadewa.ac.id)

Internet Source

<1 %

16

[ke-laut-an.blogspot.com](http://ke-laut-an.blogspot.com)

Internet Source

<1 %

17

[mmsi.binus.ac.id](http://mmsi.binus.ac.id)

Internet Source

<1 %

18

[www.kompas.com](http://www.kompas.com)

Internet Source

<1 %

19

[www.slideshare.net](http://www.slideshare.net)

Internet Source

<1 %

20

[www.mongabay.co.id](http://www.mongabay.co.id)

Internet Source

<1 %

21

[vdokumen.com](http://vdokumen.com)

Internet Source

<1 %

22

Submitted to Udayana University

Student Paper

<1 %

23	<a href="http://id.unionpedia.org">id.unionpedia.org</a> Internet Source	<1 %
24	<a href="http://afguns.blogspot.com">afguns.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
25	<a href="http://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a> Internet Source	<1 %
26	<a href="http://123dok.com">123dok.com</a> Internet Source	<1 %
27	<a href="http://staidagresik.ac.id">staidagresik.ac.id</a> Internet Source	<1 %
28	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	<1 %
29	Submitted to UIN Walisongo Student Paper	<1 %
30	<a href="http://ejournal.medistra.ac.id">ejournal.medistra.ac.id</a> Internet Source	<1 %
31	Submitted to Universitas Brawijaya Student Paper	<1 %
32	<a href="http://www.halodoc.com">www.halodoc.com</a> Internet Source	<1 %
33	<a href="http://www.cnnindonesia.com">www.cnnindonesia.com</a> Internet Source	<1 %
34	<a href="http://digilib.unhas.ac.id">digilib.unhas.ac.id</a> Internet Source	<1 %
35	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Internet Source	<1 %

---

36	<a href="http://etheses.uin-malang.ac.id">etheses.uin-malang.ac.id</a> Internet Source	<1 %
37	<a href="http://id.123dok.com">id.123dok.com</a> Internet Source	<1 %
38	<a href="http://worldfactsftw.com">worldfactsftw.com</a> Internet Source	<1 %
39	<a href="http://www.dcaf.ch">www.dcaf.ch</a> Internet Source	<1 %
40	Submitted to Universitas Singaperbangsa Karawang Student Paper	<1 %
41	<a href="http://id.educations.com">id.educations.com</a> Internet Source	<1 %
42	<a href="http://microbiologynote.com">microbiologynote.com</a> Internet Source	<1 %
43	Yusthinus T Male, Dominggus Malle, Catherina Manukpadang Bijang, Eirene Grace Fransina et al. "Analysis of Cadmium (Cd) and Lead (Pb) Metals Content On Sediment Inner Part of Ambon Bay", Indo. J. Chem. Res., 2017 Publication	<1 %
44	<a href="http://ejurnal.bppt.go.id">ejurnal.bppt.go.id</a> Internet Source	<1 %
45	<a href="http://scholar.unand.ac.id">scholar.unand.ac.id</a> Internet Source	<1 %

---

[www.dosenpendidikan.co.id](http://www.dosenpendidikan.co.id)

46

Internet Source

<1 %

---

47

[www.plengdut.com](http://www.plengdut.com)

Internet Source

<1 %

---

48

[isi.usim.edu.my](http://isi.usim.edu.my)

Internet Source

<1 %

---

49

[ulm.ac.id](http://ulm.ac.id)

Internet Source

<1 %

---

50

[validnews.id](http://validnews.id)

Internet Source

<1 %

---

51

[idoc.pub](http://idoc.pub)

Internet Source

<1 %

---

52

[roboguru.ruangguru.com](http://roboguru.ruangguru.com)

Internet Source

<1 %

---

53

[erick-kelautan.blogspot.com](http://erick-kelautan.blogspot.com)

Internet Source

<1 %

---

54

[ojs.uho.ac.id](http://ojs.uho.ac.id)

Internet Source

<1 %

---

55

[www.gamedia.com](http://www.gamedia.com)

Internet Source

<1 %

---

56

[www.sridianti.com](http://www.sridianti.com)

Internet Source

<1 %

---

57

[afidburhanuddin.wordpress.com](http://afidburhanuddin.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

---

58

[anangfirmansyahblog.files.wordpress.com](http://anangfirmansyahblog.files.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

---

59	<a href="http://journals.itb.ac.id">journals.itb.ac.id</a> Internet Source	<1 %
60	<a href="http://sesctv.net">sesctv.net</a> Internet Source	<1 %
61	<a href="http://suwidakrolasplanojaya.wordpress.com">suwidakrolasplanojaya.wordpress.com</a> Internet Source	<1 %
62	<a href="http://www.kaskus.co.id">www.kaskus.co.id</a> Internet Source	<1 %
63	Nuske Kamurahan, Nego E. Bataragoa, Anneke V. Lohoo. "Fish Abundance In South Poigar Rivermouth South Minahasa", JURNAL PERIKANAN DAN KELAUTAN TROPIS, 2020 Publication	<1 %
64	<a href="http://as-wait.icu">as-wait.icu</a> Internet Source	<1 %
65	<a href="http://cara-ngatasi.blogspot.com">cara-ngatasi.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
66	<a href="http://digitallib.iainkendari.ac.id">digitallib.iainkendari.ac.id</a> Internet Source	<1 %
67	<a href="http://jurnal.upnyk.ac.id">jurnal.upnyk.ac.id</a> Internet Source	<1 %
68	<a href="http://little-chiyoo.blogspot.com">little-chiyoo.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
69	<a href="http://reefresilience.org">reefresilience.org</a> Internet Source	<1 %

70	<a href="http://tri-nity.blogspot.com">tri-nity.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
71	<a href="http://usrtk.org">usrtk.org</a> Internet Source	<1 %
72	<a href="http://www.himedik.com">www.himedik.com</a> Internet Source	<1 %
73	<a href="http://www.pioneerteknologi.com">www.pioneerteknologi.com</a> Internet Source	<1 %
74	Avisema Sigit Saputro, Nugraheni Hadiyanti. "Pembuatan Nitrobacter untuk Pertanian Berkelanjutan", JATIMAS : Jurnal Pertanian dan Pengabdian Masyarakat, 2023 Publication	<1 %
75	Belajar dari Bungo mengelola sumberdaya alam di era desentralisasi, 2008. Publication	<1 %
76	Edward Edward, Khosanah Munawir, Deny Yogaswara, Dede Falahuddin et al. "Kandungan Logam Berat Pb, Cd, Cu, Zn, Ni dan Senyawa Polisiklik Aromatik Hdrokarbon (PAH) dalam Sedimen di Teluk Jakarta", JURNAL SUMBERDAYA AKUATIK INDOPASIFIK, 2021 Publication	<1 %
77	Farahwati Farahwati. "PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN MENJADI DASAR TERINTEGRASI DALAM PEMBANGUNAN	<1 %



SUATU WILAYAH BERDASARKAN UNDANG-UNDANG NO. 32 TAHUN 2009 TENTANG PERLINDUNGAN DAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN HIDUP", LEGALITAS, 2020

Publication

78

Gusti Rafi'atussyifa, Hidayah Nor. "Gender Disparities in Utilizing Language Features on YouTube Vlogs", Muadalah, 2023

Publication

<1 %

79

Mega Sari Juane Sofiana, Ikha Safitri, Nurhidayanti. "Occurrence of Lead (Pb) Metal in Water, Sediment, and Bioaccumulation in Giant Mudskipper (Boleopthalmus : Gobiidae) from the Pemangkat Mangrove Area West Kalimantan", Jurnal Ilmiah PLATAX, 2024

Publication

<1 %

80

Triyoni Purbonegoro. "KAJIAN RISIKO KESEHATAN MANUSIA TERKAIT KONSUMSI MAKANAN LAUT (SEAFOOD) YANG TERCEMAR LOGAM", OSEANA, 2020

Publication

<1 %

81

[artikelpendidikan.id](http://artikelpendidikan.id)

Internet Source

<1 %

82

[bioremediasi3be.wordpress.com](http://bioremediasi3be.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

83

[blogs.uajy.ac.id](http://blogs.uajy.ac.id)

Internet Source

<1 %

[desvidespoy.blogspot.com](http://desvidespoy.blogspot.com)

84

Internet Source

<1 %

85

[ejournal2.undip.ac.id](http://ejournal2.undip.ac.id)

Internet Source

<1 %

86

[erwinazizijayadipraja.wordpress.com](http://erwinazizijayadipraja.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

87

[fajarihwanisidiq.blogspot.com](http://fajarihwanisidiq.blogspot.com)

Internet Source

<1 %

88

[fdocuments.net](http://fdocuments.net)

Internet Source

<1 %

89

[hidupgaya.co](http://hidupgaya.co)

Internet Source

<1 %

90

[huggingface.co](http://huggingface.co)

Internet Source

<1 %

91

[id.scribd.com](http://id.scribd.com)

Internet Source

<1 %

92

[joecky.wordpress.com](http://joecky.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

93

[joon.co.ke](http://joon.co.ke)

Internet Source

<1 %

94

[kemenagklungkung.blogspot.com](http://kemenagklungkung.blogspot.com)

Internet Source

<1 %

95

[khidmattakafulandadisini.blogspot.com](http://khidmattakafulandadisini.blogspot.com)

Internet Source

<1 %

96

[liviniawijaya.wordpress.com](http://liviniawijaya.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

97	<a href="http://losartanhydrochlorothiazide.us.com">losartanhydrochlorothiazide.us.com</a> Internet Source	<1 %
98	<a href="http://metro.tempoco.com">metro.tempoco.com</a> Internet Source	<1 %
99	<a href="http://nanopdf.com">nanopdf.com</a> Internet Source	<1 %
100	<a href="http://nehopalliance.org">nehopalliance.org</a> Internet Source	<1 %
101	<a href="http://obatanline.com">obatanline.com</a> Internet Source	<1 %
102	<a href="http://repository.ipb.ac.id">repository.ipb.ac.id</a> Internet Source	<1 %
103	<a href="http://repository.penerbitwidina.com">repository.penerbitwidina.com</a> Internet Source	<1 %
104	<a href="http://repository.unp.ac.id">repository.unp.ac.id</a> Internet Source	<1 %
105	<a href="http://ummayustika.blogspot.com">ummayustika.blogspot.com</a> Internet Source	<1 %
106	<a href="http://www.belajarsinau.com">www.belajarsinau.com</a> Internet Source	<1 %
107	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Internet Source	<1 %
108	<a href="http://www.liputan6.com">www.liputan6.com</a> Internet Source	<1 %
109	<a href="http://www.pinhome.id">www.pinhome.id</a> Internet Source	<1 %

---

110

[www.scribd.com](http://www.scribd.com)

Internet Source

<1 %

---

111

[journal.ipb.ac.id](http://journal.ipb.ac.id)

Internet Source

<1 %

---

---

Exclude quotes    On

Exclude matches    Off

Exclude bibliography    On