

# KIMIA LINGKUNGAN



RANNO MARLANY RACHMAN  
HANIZAH BATURANTE  
JENNY DELLY  
HENDRIK GUNADI  
JUFRI MANGA'

# Kimia Lingkungan

## Penulis

Ranno Marlany Rachman

Hanizah Baturante

Jenny Delly

Hendrik Gunadi

Jufri Manga'

Penerbit

**Arsy Media**

# Kimia Lingkungan

**Penulis :**

Ranno Marlany Rachman

Hanizah Baturante

Jenny Delly

Hendrik Gunadi

Jufri Manga'

**Editor**

Muhammad Riadi Harimuswarah

Jumadil

**Desain Sampul dan Tata Letak**

Dr. Andi Arfan Sahabuddin, S.H., M.H.

**Penerbit**

Arsy Media

**ISBN** : 978-634-96098-7-6

**No. HKI** : EC002025092940

**Anggota IKAPI No. 069/SSL/2024**

**Redaksi :**

Villa Mutiara Hijau 7 No 26, Kel. Bulurokeng, Kec. Biringkanaya,

Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan

Telp. 0853-9900-0031

Website : <https://arsymedia.com>

Cetakan Pertama Juli 2025

### Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik termasuk memfotocopy, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis

#### Undang-undang Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak **Rp. 5.000.000.000,00 (Lima Miliar Rupiah)**
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat 1, dipidana paling lama **5 (lima tahun)** dan/atau denda paling banyak **Rp. 500.000.000,00 (Lima Ratus Juta Rupiah)**

# PRAKATA

Lingkungan hidup adalah laboratorium terbesar yang dimiliki manusia. Segala bentuk reaksi kimia, baik yang tampak maupun yang tersembunyi, berlangsung setiap hari di udara, air, tanah, bahkan di dalam tubuh kita. Di tengah meningkatnya kekhawatiran terhadap pencemaran dan kerusakan lingkungan, menjadikan kimia lingkungan menjadi semakin penting. Buku ini sebagai upaya untuk menjawab kebutuhan akan literatur yang tidak hanya menjelaskan prinsip-prinsip dasar kimia lingkungan, tetapi juga menghubungkannya dengan realitas dan tantangan ekologi masa kini.

Industrialisasi dan urbanisasi yang pesat, lingkungan menjadi entitas yang seringkali dikorbankan. Polusi udara, pencemaran air, degradasi tanah, hingga perubahan iklim merupakan isu-isu krusial yang berakar dari ketidakseimbangan interaksi antara manusia dan lingkungannya. Di sinilah kimia lingkungan memainkan peran penting membekali kita dengan penjelasan ilmiah yang kuat untuk mendeteksi, menganalisis, serta merumuskan solusi terhadap permasalahan lingkungan secara bertanggung jawab.

Buku ini disusun dengan harapan dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi yang berkecimpung di bidang ilmu lingkungan, kimia, serta bidang lain yang berkaitan. Selain menyajikan konsep-konsep dasar kimia lingkungan, buku ini juga dilengkapi dengan pembahasan isu-isu kontemporer dan studi kasus yang relevan dengan kondisi Indonesia dan dunia saat ini.

Kami menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan buku ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun dari para pembaca sangat kami harapkan untuk penyempurnaan edisi berikutnya. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan mendorong kepedulian kita bersama terhadap pelestarian lingkungan melalui pendekatan ilmu pengetahuan.

Makassar, Juli 2025

**Tim Penyusun**

# DAFTAR ISI

<b>PRAKATA .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ii</b>
<b>BAB 1 Pengantar Kimia Lingkungan .....</b>	<b>1</b>
A. Pendahuluan.....	1
B. Ruang Lingkup Kimia Lingkungan .....	2
C. Kimia Atmosfer.....	20
D. Reaksi Kimia di Atmosfer .....	30
E. Polutan Udara dan Dampaknya .....	34
F. Fenomena Lubang Ozon .....	43
G. Upaya Internasional Penanggulangan .....	44
H. Penutup .....	55
<b>BAB 2 Kimia Air dan Pencemaran Air.....</b>	<b>57</b>
A. Pendahuluan.....	57
B. Sifat Kimia dan Fisika Air .....	59
C. Sumber dan Jenis Pencemar Air.....	62
D. Proses Kimia dalam Perairan.....	66
E. Analisis Kualitas Air.....	70
F. Analisis Kualitas Air.....	74
G. Penutup .....	79
<b>BAB 3 PENCEMARAN LOGAM BERAT .....</b>	<b>81</b>
A. Sumber Logam Berat di Lingkungan Perairan .....	82

B. Pencemaran Lingkungan dengan Logam Berat: Masalah Kesehatan Masyarakat.....	88
C. Polusi Logam dan Mineral Berbahaya: Sumber, Toksistas, dan Manajemen .....	92
D. Tantangan dan Inovasi dalam Rekayasa Lingkungan... .....	94
E. <i>Challenges and Limitations of Remediation Efforts</i> :.....	100
<b>BAB 4 Pemanasan Global dan Perubahan Iklim .....</b>	<b>105</b>
A. Pendahuluan.....	105
B. Penyebab Pemanasan Global dan Perubahan Iklim.	106
C. Dampak Pemanasan Global Terhadap Lingkungan	108
D. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Lingkungan....	109
E. Mitigasi Terhadap Pemanasan Global dan Perubahan Iklim .....	111
F. Adaptasi Terhadap Pemanasan Global dan Perubahan Iklim .....	113
G. Penutup.....	114
<b>BAB 5 Atmosfer dan Pencemaran Udara .....</b>	<b>117</b>
A. Pendahuluan.....	117
B. Komponen Atmosfer dan Peranannya.....	118
C. Jenis-Jenis Pencemaran Udara .....	119
D. Sumber Pencemaran Udara.....	120
E. Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan....	121
F. Penutup .....	122
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>124</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>	<b>151</b>

# Pengantar Kimia Lingkungan

## A. Pendahuluan

Lingkungan merupakan sistem kompleks yang terdiri dari berbagai komponen fisik, kimia, dan biologis yang saling berinteraksi (Ma'ayan, 2017). Dalam dinamika tersebut, kimia lingkungan menjadi cabang ilmu yang berperan penting dalam memahami proses-proses kimiawi yang terjadi secara alami maupun akibat aktivitas manusia. Ilmu ini mempelajari distribusi, reaksi, dan dampak senyawa kimia di lingkungan, baik di udara, air, tanah, maupun biosfer. Oleh karena itu, pemahaman dasar tentang kimia lingkungan sangat penting sebagai landasan untuk menganalisis permasalahan pencemaran dan mencari solusi berkelanjutan (Rustan dkk., 2024).

Seiring meningkatnya industrialisasi, urbanisasi, dan eksploitasi sumber daya alam, konsentrasi berbagai polutan kimia di lingkungan mengalami peningkatan signifikan (Saxena, 2025). Zat seperti logam berat, pestisida, senyawa organik volatil, dan gas rumah kaca dapat mengubah kualitas lingkungan serta menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia dan ekosistem. Melalui pendekatan kimia lingkungan, kita dapat mengevaluasi sifat kimia dan toksisitas zat pencemar,

memprediksi pergerakan serta transformasinya di lingkungan, dan mengembangkan teknologi remediasi yang tepat.

Dengan memahami prinsip-prinsip dasar kimia lingkungan, mahasiswa dan peneliti dapat memiliki bekal ilmiah yang kuat untuk mengidentifikasi, menilai, dan mengelola dampak lingkungan dari kegiatan antropogenik (Ali & Khan, 2017). Pendekatan interdisipliner yang menggabungkan ilmu kimia, biologi, fisika, dan ilmu bumi juga diperlukan untuk mengembangkan solusi terpadu terhadap masalah lingkungan global seperti perubahan iklim, pencemaran air, dan degradasi tanah. Maka dari itu, pengantar kimia lingkungan menjadi komponen penting dalam pendidikan dan penelitian untuk mencapai pembangunan berkelanjutan dan perlindungan lingkungan hidup.

## **B. Ruang Lingkup Kimia Lingkungan**

### **Pengertian Kimia Lingkungan**

Kimia lingkungan merupakan cabang ilmu kimia yang berfokus pada studi terhadap senyawa kimia, baik alami maupun buatan manusia, yang berada dan berinteraksi di dalam lingkungan, meliputi atmosfer, hidrosfer, litosfer, dan biosfer (Hanif dkk., 2020). Kajian ini mencakup asal usul zat kimia, distribusinya di berbagai media lingkungan, perubahan reaksinya (baik reaksi fisika, kimia, maupun biologis), serta dampaknya terhadap makhluk hidup dan kualitas lingkungan secara keseluruhan.

Menurut Stanley E. Manahan (2005), seorang ahli kimia lingkungan terkemuka, "*Environmental chemistry is the study of the sources, reactions, transport, effects, and fates of chemical species in the air, water, and soil environments, and the effect of human*

*activity on these environments.*” Artinya, kimia lingkungan adalah ilmu yang mempelajari asal-usul, reaksi, pergerakan, pengaruh, dan nasib akhir dari zat kimia dalam udara, air, dan tanah, serta bagaimana aktivitas manusia mempengaruhinya.

Sementara itu, menurut Gary W. vanLoon dan Stephen J. Duffy (2005) dalam bukunya *Environmental Chemistry: A Global Perspective*, kimia lingkungan tidak hanya membahas zat-zat berbahaya dan pencemar, tetapi juga proses alami yang menjaga keseimbangan lingkungan. Mereka menekankan bahwa pemahaman terhadap reaksi kimia dalam sistem lingkungan sangat penting untuk menilai dampak kegiatan antropogenik dan mencari solusi ilmiah terhadap masalah pencemaran dan degradasi lingkungan.

Di Indonesia, menurut definisi dari Badan Standardisasi Nasional (BSN) melalui SNI 19-2454-2002 tentang *Pengelolaan Lingkungan*, kimia lingkungan berperan penting dalam menyediakan landasan ilmiah bagi pengendalian pencemaran dan perlindungan lingkungan melalui analisis terhadap senyawa kimia yang berpotensi mencemari lingkungan dan pengembangan teknologi untuk mengurangnya.

Kimia lingkungan mencakup beberapa ruang lingkup utama, yaitu:

1. Kimia atmosfer: mempelajari senyawa kimia di udara, polusi udara, reaksi fotokimia, dan efek rumah kaca.
2. Kimia air (hidrosfer): mencakup kualitas air, kimia perairan alami, dan pencemaran limbah cair.
3. Kimia tanah (geokimia lingkungan): menganalisis interaksi senyawa kimia dengan mineral tanah dan potensi toksisitas terhadap tanaman atau air tanah.

4. Kimia toksikologi lingkungan: mengevaluasi sifat racun zat kimia terhadap organisme hidup dan manusia.

## **Sejarah Perkembangan Kimia Lingkungan**

Perkembangan kimia lingkungan tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan melalui proses historis yang panjang seiring dengan kesadaran manusia terhadap dampak aktivitasnya terhadap lingkungan (Goudie, 2018). Awalnya, cabang ini tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan turunan dari ilmu kimia analitik dan kimia fisik yang kemudian berkembang menjadi bidang kajian multidisipliner. Pendorong utama lahirnya kimia lingkungan adalah meningkatnya degradasi lingkungan akibat industrialisasi, urbanisasi, dan penggunaan bahan kimia sintetis secara masif sejak awal abad ke-20.

Salah satu tonggak awal munculnya kesadaran global terhadap pentingnya kimia lingkungan adalah terbitnya buku "Silent Spring" (1962) karya Rachel Carson, seorang ahli biologi dan lingkungan asal Amerika Serikat. Dalam bukunya, Carson mengungkap dampak merusak dari penggunaan pestisida berbasis organoklorin, khususnya DDT, terhadap burung, rantai makanan, dan kesehatan manusia. Buku ini menjadi titik balik dalam sejarah ilmu lingkungan karena memicu perdebatan publik dan kebijakan lingkungan, serta menjadi inspirasi lahirnya gerakan lingkungan modern. Dari sinilah muncul kebutuhan mendesak untuk memahami perilaku senyawa kimia dalam lingkungan secara sistematis dan ilmiah.

Pada dekade 1970-an, pemerintah dan akademisi mulai membentuk lembaga khusus dan menetapkan regulasi untuk memantau dan mengendalikan pencemaran lingkungan. Di

Amerika Serikat, pembentukan Environmental Protection Agency (EPA) pada tahun 1970 menjadi momentum penting dalam pengembangan riset dan kebijakan berbasis ilmu kimia lingkungan (Conant & Balint, 2016). Kemudian, di tingkat internasional, konferensi lingkungan dunia pertama yaitu United Nations Conference on the Human Environment di Stockholm tahun 1972 turut mendorong pengakuan global terhadap pentingnya ilmu kimia dalam mengatasi masalah lingkungan.

Perkembangan selanjutnya ditandai dengan integrasi ilmu kimia lingkungan dengan bidang-bidang lain seperti toksikologi, bioteknologi, dan rekayasa lingkungan (Vallero, 2015). Teknologi instrumentasi analitik seperti kromatografi gas, spektrofotometri, dan spektrometri massa memungkinkan para ilmuwan untuk mendeteksi polutan dalam kadar sangat rendah. Selain itu, muncul pendekatan *green chemistry* atau kimia hijau yang berupaya mengurangi dampak lingkungan sejak tahap desain produk kimia, serta *environmental modeling* untuk memprediksi pergerakan dan nasib polutan dalam ekosistem (Rachman dkk., 2024).

Di Indonesia sendiri, perhatian terhadap kimia lingkungan mulai tumbuh pada era 1980-an bersamaan dengan meningkatnya kesadaran terhadap dampak pencemaran industri. Lahirnya berbagai regulasi seperti UU No. 4 Tahun 1982 tentang Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup dan pendirian Kementerian Lingkungan Hidup menjadi langkah penting dalam mengembangkan studi kimia lingkungan secara nasional. Perguruan tinggi dan lembaga riset mulai membuka program studi dan laboratorium kimia lingkungan untuk mendukung pemantauan kualitas air, udara, dan tanah.

Sejarah kimia lingkungan merupakan hasil akumulasi kesadaran ekologis, krisis pencemaran yang nyata, serta kemajuan teknologi analitik dan regulasi. Hingga saat ini, kimia lingkungan terus berkembang sebagai bidang yang krusial dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim global.

## **Komponen dan Sistem Lingkungan**

Lingkungan hidup adalah suatu kesatuan ruang yang meliputi seluruh benda, daya, keadaan, dan makhluk hidup, termasuk manusia dan perilakunya yang memengaruhi kelangsungan kehidupan serta kesejahteraan manusia dan makhluk hidup lainnya (Mehaffy & Salingaros, 2017). Dalam studi kimia lingkungan, pemahaman tentang komponen dan sistem lingkungan sangat penting karena semua reaksi kimia yang terjadi di alam berlangsung dalam konteks media lingkungan tertentu. Komponen-komponen tersebut saling berinteraksi dan membentuk sistem lingkungan yang kompleks dan dinamis.

### **1. Komponen Lingkungan**

Komponen lingkungan secara umum dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

a **Komponen Biotik (Biotic Components):**

Yaitu semua makhluk hidup yang terdapat di dalam suatu ekosistem, mencakup:

- i **Produsen:** Organisme autotrof seperti tumbuhan hijau dan fitoplankton yang menghasilkan makanan melalui fotosintesis.
- ii **Konsumen:** Organisme heterotrof seperti manusia, hewan herbivora, karnivora, dan omnivora.

iii Pengurai (Decomposer): Organisme seperti bakteri dan jamur yang menguraikan bahan organik menjadi unsur yang dapat digunakan kembali dalam siklus ekologi.

b Komponen Abiotik (Abiotic Components):

Yaitu komponen tak hidup yang menjadi medium atau substrat bagi makhluk hidup, meliputi:

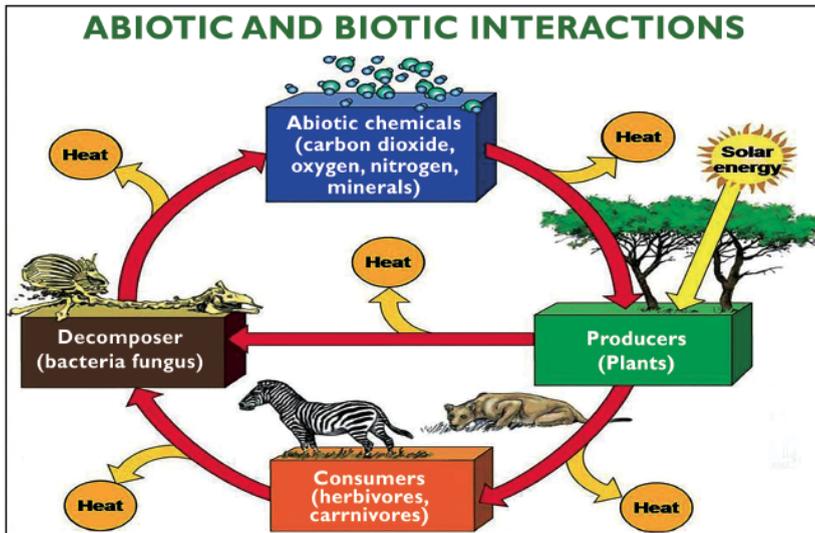
i Udara (atmosfer): Komposisi gas seperti nitrogen ( $N_2$ ), oksigen ( $O_2$ ), karbon dioksida ( $CO_2$ ), serta polutan seperti  $SO_2$  dan  $NO_x$ .

ii Air (hidrosfer): Meliputi laut, sungai, danau, dan air tanah yang berperan dalam siklus air dan sebagai pelarut reaksi kimia.

iii Tanah (litosfer): Menyediakan unsur hara dan tempat berpijak bagi organisme.

iv Cahaya, suhu, dan kelembapan: Berperan dalam proses fotosintesis, metabolisme organisme, dan reaksi kimia alami.

Interaksi antara komponen biotik dan abiotik ini menentukan kestabilan suatu lingkungan serta potensi terjadinya pencemaran atau perubahan kualitas lingkungan (Kumar & Karthika, 2020).



Gambar 1. Interaksi antara komponen biotik dan abiotik (NEXT IAS Contributors, 2024).

## 2. Sistem Lingkungan

Sistem lingkungan adalah interaksi dinamis antar komponen-komponen lingkungan dalam suatu kesatuan fungsional yang saling memengaruhi (Bennett & Chorley, 2015). Sistem ini bersifat terbuka, artinya menerima masukan dari luar (input) seperti energi matahari dan bahan kimia, serta menghasilkan keluaran (output) seperti panas, limbah, dan bahan organik.

Dalam kimia lingkungan, sistem ini dipandang sebagai media tempat berlangsungnya berbagai reaksi kimia alami maupun antropogenik, yang mencakup:

- a Sistem Atmosfer: Lapisan gas yang menyelubungi bumi, tempat terjadinya reaksi fotokimia, pembentukan ozon, dan pencemaran udara seperti kabut asap (smog), hujan asam, dan peningkatan gas rumah kaca.

- b Sistem Hidrosfer: Menyangkut seluruh perairan di bumi, di mana terjadi pelarutan, sedimentasi, dan degradasi senyawa kimia. Perairan menjadi medium transportasi dan transformasi polutan seperti logam berat dan senyawa organik.
- c Sistem Litosfer: Merujuk pada komponen tanah dan batuan, tempat berlangsungnya akumulasi dan adsorpsi zat kimia, serta interaksi antara bahan kimia dan mikroorganisme tanah (Basuki dkk., 2023).
- d Sistem Biosfer: Ruang hidup makhluk hidup yang mencakup interaksi kimia antara organisme dan lingkungannya. Proses seperti bioakumulasi dan biomagnifikasi terjadi dalam sistem ini.

### 3. Hubungan Antar Sistem

Keempat sistem lingkungan tidak berdiri sendiri, tetapi saling terhubung melalui berbagai siklus biogeokimia (seperti siklus karbon, nitrogen, dan air) (Raimi, Abiola, & Omini, 2021). Misalnya, emisi gas CO<sub>2</sub> dari aktivitas industri (atmosfer) akan larut dalam air laut (hidrosfer), memengaruhi kehidupan biota laut (biosfer), dan mengendap dalam sedimen laut (litosfer).

Pemahaman mendalam tentang komponen dan sistem lingkungan sangat penting untuk analisis penyebaran polutan, evaluasi risiko lingkungan, dan pengembangan kebijakan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan.

## Peran Kimia dalam Masalah Lingkungan

Ilmu kimia memiliki peran sentral dalam memahami, menganalisis, dan mencari solusi terhadap berbagai permasalahan lingkungan (Kogan & Shakhparonova, 2017). Kimia tidak hanya berfungsi sebagai alat untuk menjelaskan perubahan materi, tetapi juga menjadi fondasi ilmiah untuk menjelaskan bagaimana polutan terbentuk, bagaimana pergerakannya di alam, serta bagaimana dampaknya terhadap makhluk hidup dan lingkungan secara keseluruhan. Dalam konteks ini, kimia lingkungan bertindak sebagai jembatan antara ilmu dasar dan penerapan praktis dalam pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

### 1. Identifikasi dan Karakterisasi Polutan

Peran utama kimia dalam masalah lingkungan adalah mendeteksi dan mengidentifikasi senyawa pencemar (polutan) dalam berbagai media lingkungan seperti air, udara, tanah, dan biota. (Rathi, Kumar, & Vo, 2021). Melalui analisis kimia, ilmuwan dapat menentukan:

- a Komposisi kimia suatu pencemar (organik, anorganik, logam berat, pestisida, senyawa radioaktif)
- b Konsentrasi dan toksisitasnya
- c Sifat fisika-kimia seperti kelarutan, volatilitas, dan reaktivitas
- d Bentuk spesiasi kimia (misalnya:  $\text{Cr}^{3+}$  vs.  $\text{Cr}^{6+}$ )

Teknik analitik seperti kromatografi gas (GC), spektrometri massa (MS), dan spektroskopi UV-Vis/FTIR digunakan secara luas dalam pemantauan kualitas lingkungan.

## 2. Pemahaman Mekanisme Reaksi dan Transportasi

Kimia juga membantu menjelaskan mekanisme reaksi kimia yang terjadi di lingkungan, baik secara alami maupun akibat aktivitas manusia (Larson, 2018). Misalnya:

- a Pembentukan ozon troposferik dan kabut asap fotokimia melalui reaksi nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) dengan senyawa organik volatil (VOC) di bawah sinar UV
- b Proses asamifikasi (hujan asam) dari emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  yang bereaksi dengan uap air membentuk  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{HNO}_3$
- c Reaksi biodegradasi dan fotodegradasi terhadap senyawa organik di air dan tanah

Selain itu, ilmu kimia memungkinkan pemodelan transportasi dan transformasi polutan, seperti difusi, adsorpsi, koagulasi, atau presipitasi dalam sistem lingkungan.

## 3. Penilaian Risiko dan Dampak Lingkungan

Dengan data kimia yang akurat, ilmuwan dapat melakukan penilaian risiko lingkungan (environmental risk assessment) terhadap manusia dan ekosistem (Syberg, & Hansen, 2016). Kimia menyediakan informasi penting untuk:

- a Menentukan ambang batas aman (threshold limit values)
- b Menilai bioakumulasi dan biomagnifikasi senyawa toksik dalam rantai makanan

- c Mengklasifikasikan bahan kimia berdasarkan kategori bahaya seperti karsinogenik, mutagenik, atau beracun bagi reproduksi (CMR)

Informasi ini menjadi dasar dalam pembuatan kebijakan, standar kualitas lingkungan (misal: Baku Mutu Air, Udara), dan peraturan seperti REACH di Uni Eropa atau PP No. 22 Tahun 2021 di Indonesia.

#### **4. Pengembangan Teknologi Remediasi**

Kimia juga sangat berperan dalam merancang teknologi pengolahan dan remediasi pencemaran lingkungan. Beberapa aplikasi kimia dalam solusi teknologi meliputi:

- a Koagulasi-flokulasi untuk mengendapkan limbah cair
- b Adsorpsi menggunakan karbon aktif atau zeolit
- c Oksidasi lanjutan (AOP) seperti ozonasi atau Fenton untuk degradasi senyawa organik kompleks
- d Fitoremediasi dan bioremediasi dengan bantuan tanaman atau mikroorganisme untuk mendegradasi atau menstabilkan polutan
- e Pengolahan emisi gas melalui scrubber kimia atau katalis

#### **5. Pendekatan Kimia Hijau (Green Chemistry)**

Sebagai bentuk preventif, kimia juga berperan dalam mengembangkan produk dan proses yang ramah lingkungan. Prinsip kimia hijau mendorong:

- a Pengurangan penggunaan bahan berbahaya

- b Desain proses sintesis yang minim limbah
- c Pemanfaatan sumber daya terbarukan
- d Pengembangan bahan kimia yang mudah terurai di alam

Pendekatan ini mendukung industri untuk mengurangi jejak ekologisnya sejak tahap perancangan, bukan hanya setelah dampak terjadi.

### **Pendekatan Interdisipliner dalam Studi Kimia Lingkungan**

Kimia lingkungan merupakan bidang ilmu yang kompleks dan dinamis karena melibatkan beragam proses fisik, kimia, biologis, dan sosial dalam sistem lingkungan (Manahan, 2022). Oleh sebab itu, studi kimia lingkungan tidak dapat diselesaikan hanya dengan pendekatan kimia semata. Diperlukan suatu pendekatan interdisipliner, yaitu integrasi dari berbagai cabang ilmu pengetahuan untuk memahami permasalahan lingkungan secara menyeluruh, serta merancang solusi yang holistik dan aplikatif.

#### **1. Hubungan Kimia dengan Ilmu Fisika dan Matematika**

Ilmu fisika dan matematika memberikan dasar kuantitatif dan konseptual dalam analisis lingkungan (Mayes & Myers, 2015). Dalam kimia lingkungan, fisika diperlukan untuk memahami mekanisme perpindahan massa dan energi, seperti difusi polutan, turbulensi udara, transfer panas, dan aliran air. Sementara itu, matematika sangat penting dalam penyusunan model prediktif pencemaran, perhitungan kinetika reaksi, dan pemrosesan data lingkungan.

Contoh penerapannya adalah dalam model dispersi polutan di udara, di mana persamaan Navier-Stokes

(fisika fluida) digunakan untuk menggambarkan aliran udara, sementara model Gaussian digunakan untuk memperkirakan konsentrasi polutan berdasarkan data emisi dan kecepatan angin.

## **2. Integrasi dengan Ilmu Biologi dan Ekologi**

Ilmu biologi dan ekologi sangat penting dalam mengkaji interaksi antara senyawa kimia dengan organisme hidup (Evstropov, Trushkova, & Nikhayeva, 2019). Melalui biologi, kita dapat memahami efek toksik polutan pada tingkat sel, jaringan, hingga populasi. Ekologi memberikan kerangka untuk memahami hubungan antara spesies dan lingkungannya, serta bagaimana zat kimia memengaruhi struktur dan fungsi ekosistem.

Konsep bioakumulasi dan biomagnifikasi, misalnya, menjelaskan bagaimana logam berat atau senyawa organik persisten dapat terakumulasi dalam tubuh organisme dan meningkat konsentrasinya di setiap tingkat trofik rantai makanan. Studi ini memerlukan pemahaman lintas bidang antara biokimia, ekotoksikologi, dan mikrobiologi.

## **3. Peran Ilmu Geografi dan Geologi**

Geografi lingkungan dan geologi berperan penting dalam memetakan distribusi spasial pencemaran, mempelajari karakteristik lahan, batuan, dan tanah yang menjadi media pergerakan zat kimia (Zhang dkk., 2023). Geografi menyediakan pendekatan spasial dan teknologi seperti Geographic Information System (GIS) dan remote sensing untuk memantau dan menganalisis sebaran polutan dalam skala regional hingga global.

Sementara itu, geologi membantu dalam memahami kontaminasi air tanah, sifat adsorpsi tanah terhadap logam berat, dan proses pelapukan batuan yang menghasilkan senyawa kimia alami. Kombinasi ini sangat berguna dalam perencanaan remediasi tanah tercemar dan pengelolaan sumber daya air.

#### **4. Keterlibatan Ilmu Sosial dan Ekonomi**

Masalah lingkungan bukan hanya persoalan teknis, tetapi juga sosial dan ekonomi (Gudmanian dkk., 2020). Oleh karena itu, pendekatan kimia lingkungan juga harus melibatkan ilmu sosial seperti sosiologi, antropologi, serta ilmu ekonomi lingkungan. Ilmu sosial dibutuhkan untuk memahami perilaku masyarakat terhadap lingkungan, efektivitas edukasi lingkungan, serta dampak sosial dari pencemaran.

Ilmu ekonomi membantu mengevaluasi biaya dan manfaat dari tindakan pengendalian pencemaran (cost-benefit analysis), menilai nilai ekonomi dari jasa lingkungan (environmental valuation), serta merancang instrumen ekonomi seperti pajak lingkungan dan subsidi hijau. Hal ini penting agar solusi kimia tidak hanya efektif secara ilmiah, tetapi juga efisien secara ekonomi dan diterima secara sosial.

#### **5. Sinergi dengan Teknik dan Teknologi**

Dalam implementasinya, kimia lingkungan sangat erat kaitannya dengan rekayasa lingkungan dan teknologi (Mihelcic & Zimmerman, 2021). Bidang teknik lingkungan menyediakan alat dan metode untuk pengolahan limbah, rekayasa kualitas udara, pengendalian pencemaran air, dan manajemen limbah padat. Di sisi lain, teknologi modern seperti sensor

kimia, nanoteknologi, dan bioteknologi lingkungan dikembangkan berdasarkan prinsip-prinsip kimia untuk meningkatkan efisiensi pemantauan dan remediasi pencemaran.

Contohnya adalah penggunaan bioreaktor untuk mengolah limbah cair industri yang mengandung bahan kimia toksik dengan bantuan mikroorganisme yang dioptimalkan melalui rekayasa genetika.

## **Metode Analisis Kimia dalam Lingkungan**

Metode analisis kimia dalam lingkungan adalah seperangkat teknik dan prosedur ilmiah yang digunakan untuk mendeteksi, mengidentifikasi, dan mengukur konsentrasi zat kimia (polutan maupun senyawa alami) dalam berbagai media lingkungan seperti air, udara, tanah, dan biota (Mitra & Kebbekus, 2018). Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengetahui kualitas lingkungan, mengevaluasi tingkat pencemaran, dan menyediakan data ilmiah yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan serta penegakan regulasi lingkungan.

Analisis kimia lingkungan melibatkan berbagai tahapan penting mulai dari pengambilan sampel, preparasi sampel, pemisahan, pengukuran, hingga interpretasi data hasil pengujian. Setiap metode dipilih berdasarkan sifat fisikokimia senyawa target, sensitivitas yang dibutuhkan, serta jenis media yang diuji.

### **1. Tahapan Umum Analisis Kimia Lingkungan**

#### **Pengambilan Sampel (Sampling)**

Tahap awal ini sangat krusial karena hasil analisis sangat tergantung pada kualitas sampel. Sampling harus mewakili kondisi lingkungan sebenarnya dan

memperhatikan faktor waktu, lokasi, serta teknik pengawetan.

- a Air: diambil pada kedalaman tertentu, memperhatikan aliran dan waktu.
- b Udara: menggunakan alat seperti high-volume air sampler, impinger, atau canister.
- c Tanah: dilakukan dengan bor tanah, spatula, atau core sampler.
- d Biota: seperti ikan, tumbuhan air, atau jaringan hewan, dipilih berdasarkan rantai makanan dan potensi akumulasi.

### **Preparasi Sampel (Sample Preparation)**

Sampel seringkali perlu diproses terlebih dahulu agar zat target dapat diukur secara akurat. Proses ini bisa meliputi:

- a Filtrasi dan sentrifugasi
- b Ekstraksi (padat-cair atau cair-cair)
- c Digesti asam (terutama untuk logam berat)
- d Homogenisasi dan pengenceran

### **Analisis Instrumen (Instrumental Analysis)**

Penggunaan alat analitik modern memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi polutan dengan sangat akurat, bahkan dalam kadar sangat rendah (ppm, ppb, ppt).

## **2. Metode Analisis Berdasarkan Jenis Senyawa (Cieśła & Moaddel, 2016).**

### **Analisis Senyawa Logam (Anorganik)**

- a AAS (Atomic Absorption Spectroscopy):  
Digunakan untuk mendeteksi logam berat seperti Pb, Cd, Hg, Zn, Fe. Prinsipnya adalah absorpsi cahaya oleh atom logam bebas.
- b ICP-OES/ICP-MS (Inductively Coupled Plasma):  
Memiliki sensitivitas tinggi, mampu mendeteksi multi-elemen sekaligus dalam konsentrasi sangat rendah.
- c XRF (X-Ray Fluorescence):  
Cocok untuk analisis logam dalam padatan seperti tanah atau sedimen.

### **Analisis Senyawa Organik**

- a GC (Gas Chromatography):  
Digunakan untuk senyawa organik volatil (VOC), hidrokarbon aromatik, pestisida, pelarut. Sering dipasangkan dengan MS (mass spectrometry) untuk identifikasi struktur senyawa.
- b HPLC (High Performance Liquid Chromatography):  
Untuk senyawa organik non-volatil seperti pestisida, deterjen, bahan aktif obat, senyawa fenolik.

### **Analisis Senyawa Nutrien dan Ion**

- a Spektrofotometri UV-Vis:  
Digunakan untuk mengukur nitrat, nitrit, fosfat, sulfat, BOD, COD, logam tertentu dalam bentuk kompleks.
- b ISE (Ion Selective Electrode):

Untuk analisis cepat ion seperti pH,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ .

c Titrasi Kimia:

Digunakan dalam analisis klasik seperti kadar asam-basa, kesadahan, alkalinitas,  $\text{Cl}^-$  (argentometri), dan oksidasi (permanganometri).

### 3. Parameter Umum Kualitas Lingkungan yang Diuji

Tabel 1. Parameter Umum Kualitas Lingkungan

Media	Parameter Umum	Contoh Metode
Air	pH, DO, COD, BOD, TSS, logam berat, pestisida	Spektrofotometri, AAS, HPLC
Udara	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , CO, $\text{O}_3$ , VOC	GC, UV Fluorescence, Chemiluminescence
Tanah	pH tanah, C-organik, logam berat, kandungan pestisida	AAS, GC, XRF
Biota	Bioakumulasi logam berat, klorin organik, pestisida	GC-MS, ICP-MS

Sumber: Data Primer, 2025

### 4. Standar dan Validasi Metode

Metode analisis dalam kimia lingkungan harus memenuhi standar akurasi dan validasi, mengikuti protokol internasional dan nasional seperti:

- a USEPA Method (United States Environmental Protection Agency)

- b Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
- c SNI (Standar Nasional Indonesia)
- d ISO 17025 untuk laboratorium terakreditasi

Parameter validasi mencakup:

- a Limit Deteksi (LOD)
- b Limit Kuantifikasi (LOQ)
- c Presisi dan akurasi
- d Reprodusibilitas
- e Recovery

## C. Kimia Atmosfer

### 1. Struktur dan Lapisan Atmosfer

#### Pengertian Atmosfer

Atmosfer adalah lapisan gas yang menyelimuti permukaan bumi dan terikat oleh gaya gravitasi (Chandrasekar, 2022). Atmosfer sangat penting karena berfungsi sebagai pelindung kehidupan di bumi, menyerap radiasi ultraviolet berbahaya, menjaga suhu bumi melalui efek rumah kaca, serta menjadi medium terjadinya cuaca dan iklim (Antarissubhi dkk., 2023).

Atmosfer tersusun atas campuran gas yang terdiri dari:

- a Nitrogen ( $N_2$ )  $\pm$  78%
- b Oksigen ( $O_2$ )  $\pm$  21%
- c Argon (Ar)  $\pm$  0,93%
- d Karbon dioksida ( $CO_2$ )  $\pm$  0,04% (berfluktuasi)
- e Uap air (bervariasi hingga 4%)

- f Gas-gas jejak lain (neon, helium, metana, hidrogen, ozon, dll.)

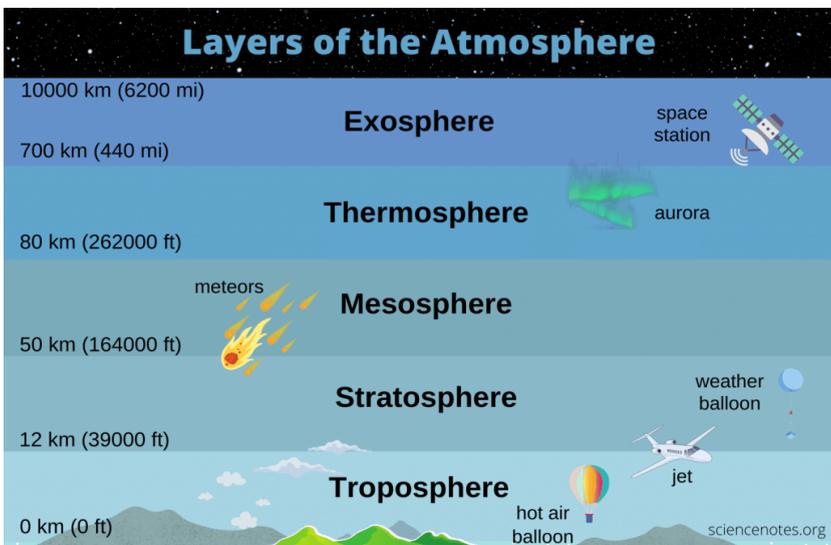
## 2. Struktur Vertikal Atmosfer Berdasarkan Suhu

Atmosfer bumi secara vertikal dibagi menjadi lima lapisan utama berdasarkan perubahan suhu terhadap ketinggian (lapse rate), yaitu:

- a Troposfer
  - i Ketinggian: 0 – 8 km di kutub, 0 – 16 km di ekuator
  - ii Ciri utama: Suhu menurun dengan bertambahnya ketinggian (sekitar  $-6,5^{\circ}\text{C}$  per km)
  - iii Fenomena: Tempat berlangsungnya hampir semua fenomena cuaca seperti hujan, petir, angin, dan badai.
  - iv Komposisi: Mengandung hampir seluruh uap air dan partikel debu.
  - v Batas atas: Disebut tropopause, lapisan transisi menuju stratosfer, dengan suhu hampir konstan ( $\sim -56^{\circ}\text{C}$ ).
- b Stratosfer
  - i Ketinggian:  $\pm 16 - 50$  km
  - ii Ciri utama: Suhu meningkat seiring ketinggian akibat penyerapan radiasi UV oleh ozon ( $\text{O}_3$ )
  - iii Fenomena: Tempat terbentuknya lapisan ozon yang melindungi bumi dari sinar ultraviolet.
  - iv Stabilitas: Udara relatif tenang dan stabil, cocok untuk penerbangan pesawat jet.

- v Batas atas: Stratopause (suhu maksimum sekitar  $0^{\circ}\text{C}$ ).
- c Mesosfer
  - i Ketinggian:  $\pm 50 - 85$  km
  - ii Ciri utama: Suhu kembali menurun dengan ketinggian, bisa mencapai  $-90^{\circ}\text{C}$  (terdingin di atmosfer).
  - iii Fenomena: Tempat terbakar dan hancurnya meteor karena gesekan udara.
  - iv Kepadatan udara: Sangat tipis, tapi masih cukup untuk menghasilkan gesekan.
  - v Batas atas: Mesopause, transisi ke termosfer.
- d Termosfer
  - i Ketinggian:  $\pm 85 - 500$  km
  - ii Ciri utama: Suhu meningkat tajam hingga  $2.000^{\circ}\text{C}$  atau lebih karena penyerapan radiasi UV dan sinar X dari matahari.
  - iii Fenomena:
    - 1) Terjadi aurora borealis dan australis (kutub utara & selatan)
    - 2) Tempat orbit Stasiun Luar Angkasa Internasional (ISS)
  - vi Kepadatan udara: Sangat tipis; meskipun suhu tinggi, udara terlalu jarang untuk terasa panas.
  - vii \*\*Bagian bawah termosfer dikenal sebagai ionosfer, penting untuk transmisi gelombang radio dan komunikasi satelit.

- e 5. Eksosfer
- i Ketinggian:  $\pm 500 - 10.000$  km (bergantung kondisi matahari)
  - ii Ciri utama: Lapisan paling luar atmosfer, transisi ke ruang angkasa (interplanetary space)
  - iii Kepadatan: Sangat rendah; terdiri dari atom-atom hidrogen dan helium yang tersebar bebas.
  - iv Fenomena: Satelit buatan berorbit di wilayah ini. Partikel gas perlahan-lahan dapat lepas dari gravitasi bumi.



Gambar 2. Lima lapisan atmosfer adalah troposfer, stratosfer, mesosfer, termosfer, dan eksosfer. (Helmenstine, 2022)

### 3. Struktur Atmosfer Berdasarkan Komposisi

Selain berdasarkan suhu, atmosfer juga dibagi menjadi dua lapisan berdasarkan komposisi gasnya:

- a Homosfer (0 –  $\pm 80$  km)

- i Komposisi gas homogen akibat pencampuran turbulen ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar,  $CO_2$ ).
- ii Meliputi troposfer, stratosfer, dan mesosfer.
- b Heterosfer (>80 km)
  - i Komposisi gas mulai tersusun berdasarkan massa jenis (gravitasi), gas ringan seperti H dan He mendominasi bagian atas.
  - ii Termasuk termosfer dan eksosfer.

#### 4. Fungsi Penting Atmosfer bagi Kehidupan

- a Menyaring radiasi: Ozon menyerap UV; atmosfer menyerap sinar kosmik dan sinar gamma.
- b Mengatur suhu bumi: Melalui efek rumah kaca (greenhouse effect)
- c Menyediakan gas vital: Seperti oksigen untuk respirasi dan karbon dioksida untuk fotosintesis
- d Media transportasi cuaca dan air: Melalui siklus hidrologi (awan, hujan, angin) (Tanje dkk., 2024).
- e Melindungi dari benda luar angkasa: Sebagian besar meteor terbakar di mesosfer

#### Komposisi Kimia Atmosfer

Atmosfer adalah campuran kompleks dari berbagai gas, uap air, dan partikel padat atau cair (aerosol) yang menyelimuti bumi (Smirnov, 2020). Komposisi kimia atmosfer sangat penting untuk mendukung kehidupan, mengatur suhu bumi, melindungi dari radiasi matahari, dan memungkinkan terjadinya proses kimia lingkungan yang dinamis seperti pembentukan ozon, hujan asam, dan efek rumah kaca. Komposisi ini tidak bersifat statis, melainkan

dipengaruhi oleh faktor alam dan aktivitas manusia (antropogenik).

### 1. Komponen Utama Atmosfer (Gas Tetap)

Gas-gas tetap (permanent gases) adalah komponen yang konsentrasinya relatif konstan di seluruh lapisan homosfer (0–80 km), karena tercampur secara merata melalui konveksi dan turbulensi atmosfer. Komponen utama ini membentuk  $\pm 99,9\%$  volume atmosfer kering:

Tabel 2. Komponen Utama Atmosfer

Gas	Simbol Kimia	Persentase Volume (%)	Fungsi Penting
Nitrogen	N <sub>2</sub>	$\pm 78,08\%$	Sumber nutrisi tumbuhan, penyeimbang oksigen
Oksigen	O <sub>2</sub>	$\pm 20,95\%$	Penting untuk respirasi dan pembakaran
Argon	Ar	$\pm 0,93\%$	Gas inert, tidak reaktif
Karbon Dioksida	CO <sub>2</sub>	$\pm 0,04\%$ (variabel)	Gas rumah kaca utama, penting untuk fotosintesis
Neon, Helium, Krypton, Xenon	Ne, He, Kr, Xe	$< 0,001\%$	Gas mulia, fungsi khusus dalam industri dan sains

Sumber : Data Primer, 2025

## 2. Komponen Variabel (Gas Jejak yang Fluktuatif)

Gas-gas ini jumlahnya kecil (jejak), tetapi sangat berpengaruh besar terhadap sistem iklim dan kualitas udara. Von Schneidemesser dkk., 2015). Konsentrasinya dapat berubah tergantung lokasi, musim, aktivitas manusia, dan kejadian alam.

**Tabel 3.** Komponen Variabel (Gas Jejak yang Fluktuatif)

Gas	Simbol Kimia	Kisaran Konsentrasi	Fungsi / Dampak
Uap air	H <sub>2</sub> O	0–4%	Pengatur suhu, sumber awan dan hujan
Ozon	O <sub>3</sub>	0,01–10 ppm	Penyerap UV (stratosfer), polutan (troposfer)
Metana	CH <sub>4</sub>	±1,9 ppm	Gas rumah kaca kuat, berasal dari pertanian & limbah
Nitrogen oksida	NO, NO <sub>2</sub> (NO <sub>x</sub> )	0–0,1 ppm	Prekursor ozon troposfer,

Gas	Simbol Kimia	Kisaran Konsentrasi	Fungsi / Dampak
			pembentuk hujan asam
Sulfur dioksida	SO <sub>2</sub>	0–0,01 ppm	Pembentuk hujan asam, berasal dari pembakaran batu bara
Karbon monoksida	CO	0–0,1 ppm	Beracun, hasil pembakaran tidak sempurna
CFC, HFC, SF <sub>6</sub>	(beragam)	ppb – ppt	Gas sintetis, merusak ozon, pemicu pemanasan global

Sumber : Data Primer, 2025

Catatan: Konsentrasi dalam ppm (parts per million), ppb (billion), ppt (trillion).

### 3. Partikulat dan Aerosol

Selain gas, atmosfer juga mengandung partikel padat dan cair berukuran mikroskopik yang disebut aerosol (Boucher & Boucher, 2015). Mereka dapat bersifat alami maupun buatan manusia:

**Tabel 4.** Sumber dan Dampak Aerosol

Jenis Aerosol	Sumber	Dampak
Debu mineral	Tanah kering, badai pasir	Mempengaruhi pembentukan awan
Abu vulkanik	Letusan gunung berapi	Mengganggu penerbangan, menurunkan suhu global
Asap dan jelaga (soot)	Pembakaran biomassa dan kendaraan	Berbahaya bagi paru-paru, memperkuat efek rumah kaca
Garam laut	Percikan ombak laut	Nukleasi awan, refleksi cahaya matahari
Sulfat dan nitrat aerosol	Reaksi gas $\text{SO}_2$ dan $\text{NO}_x$ di atmosfer	Komponen utama hujan asam dan $\text{PM}_{2.5}$

Sumber : Data Primer, 2025

Aerosol berperan penting dalam pemantulan (albedo) sinar matahari, pembentukan awan, dan penyebaran polutan.

#### 4. Komposisi Kimia Atmosfer Menurut Lapisan

Atmosfer tidak bersifat homogen secara vertikal (Päschke, Leinweber, & Lehmann, 2015). Komposisinya berubah seiring bertambahnya ketinggian, khususnya di atas 80 km (heterosfer).

**Tabel 5.** Komposisi Kimia Atmosfer

Lapisan	Komposisi Dominan	Catatan Khusus
Troposfer	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , aerosol, polutan	Tempat cuaca, polusi, dan aktivitas manusia
Stratosfer	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Lapisan ozon maksimal di 20–30 km
Mesosfer	Gas mulai terionisasi, konsentrasi sangat tipis	Tempat terbakar meteor
Termosfer	O, N, He, ion-ion	Pembentukan aurora, lapisan ionosfer
Eksosfer	H, He (sangat jarang dan tersebar)	Transisi ke ruang angkasa

Sumber : Data Primer, 2025

## 5. Dampak Perubahan Komposisi Atmosfer

Perubahan komposisi kimia atmosfer, terutama karena kegiatan manusia (antropogenik), menyebabkan berbagai masalah lingkungan global (Petrov, Nikolaeva, & Dimitrov, 2023). antara lain:

a Efek rumah kaca dan pemanasan global:

Peningkatan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan N<sub>2</sub>O menyebabkan penyerapan panas berlebih → perubahan iklim.

b Penipisan lapisan ozon:

Senyawa CFC dan halon melepaskan Cl dan Br yang merusak molekul O<sub>3</sub> di stratosfer.

c Pencemaran udara:

Akumulasi CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> troposferik, dan partikel menyebabkan penyakit pernapasan, penurunan produktivitas tanaman, dan kerusakan bangunan.

d Hujan asam:

Gas NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> teroksidasi membentuk asam nitrat dan asam sulfat, menurunkan pH hujan hingga merusak tanah, air, dan ekosistem

#### **D. Reaksi Kimia di Atmosfer**

Atmosfer bukanlah sistem yang statis, melainkan ruang dinamis tempat berlangsungnya berbagai reaksi kimia kompleks yang terjadi secara kontinu (Gill, 2016). Reaksi-reaksi tersebut melibatkan gas-gas alami maupun antropogenik, partikel aerosol, radiasi matahari, dan kelembapan udara. Reaksi kimia atmosferik berperan penting dalam:

1. Menentukan komposisi udara,
2. Menghasilkan dan menghancurkan ozon,
3. Membentuk polutan sekunder seperti kabut asap fotokimia,
4. Menghasilkan hujan asam,
5. Menentukan umur atmosferik senyawa gas rumah kaca,
6. Menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim.

#### **Jenis-Jenis Reaksi Kimia di Atmosfer (Akimoto, 2016):**

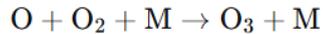
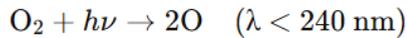
## 1. Reaksi Fotokimia (Photochemical Reactions)

Reaksi fotokimia terjadi akibat penyinaran sinar ultraviolet (UV) dari matahari yang memicu pemutusan ikatan senyawa kimia (*photodissociation*) atau eksitasi molekul.

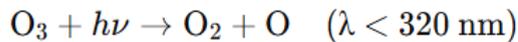
Contoh:

Pembentukan dan perusakan ozon stratosfer:

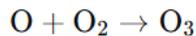
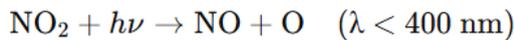
Pembentukan ozon (Chapman mechanism):



Penghancuran ozon oleh radiasi UV:



Photodissociation polutan:

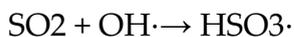


## 2. Reaksi Redoks (Oksidasi-Reduksi)

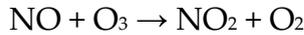
Reaksi ini umum terjadi di atmosfer, terutama dalam pembentukan ozon troposfer, oksidasi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  menjadi asam, serta degradasi senyawa organik.

Contoh:

a Oksidasi sulfur dioksida menjadi asam sulfat:



b Oksidasi NO menjadi  $\text{NO}_2$ :

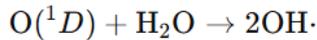
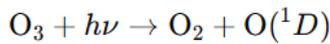


### 3. Reaksi dengan Radikal Bebas

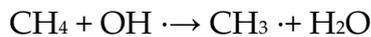
Radikal bebas adalah atom/molekul dengan elektron tak berpasangan yang sangat reaktif. Radikal utama dalam atmosfer:  $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{HO}_2\cdot$ ,  $\text{NO}_3\cdot$ , dan  $\text{Cl}\cdot$ . Radikal ini terbentuk melalui fotodisosiasi dan reaksi berantai

Contoh:

- a Pembentukan radikal hidroksil ( $\text{OH}\cdot$ ):



- b Reaksi degradasi metana oleh  $\text{OH}\cdot$ :



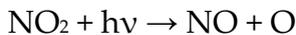
Radikal  $\text{OH}\cdot$  dianggap sebagai “detergen atmosfer” karena mampu mengoksidasi berbagai polutan organik.

## Reaksi Kimia Penting di Lapisan Atmosfer

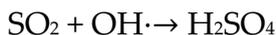
### 1. Di Troposfer (0–12 km)

- a Kabut asap fotokimia (photochemical smog):

Terjadi saat sinar matahari memicu reaksi antara  $\text{NO}_x$  dan  $\text{VOC} \rightarrow$  membentuk ozon troposferik dan peroksiasetil nitrat (PAN) yang bersifat iritan:



- b Reaksi hujan asam:



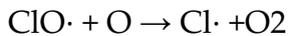
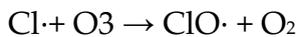
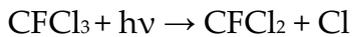
c Degradasi VOC:



## 2. Di Stratosfer (12–50 km)

a Siklus pembentukan dan perusakan ozon (Chapman Cycle)

b Reaksi perusakan ozon oleh CFC:



→ Satu atom Cl dapat menghancurkan ribuan molekul ozon (reaksi katalitik berantai)

### Reaksi Kimia Non-Gas: Interaksi dengan Aerosol dan Permukaan Awan (Chang, 2015).

Reaksi atmosfer tidak selalu berlangsung di fase gas. Banyak reaksi kimia penting terjadi di permukaan cairan/partikel seperti:

1. Konversi gas ke partikel (secondary aerosol formation)
2. Reaksi gas dalam butir air hujan atau awan
3. Pembentukan partikulat  $\text{PM}_{2.5}$  dari reaksi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NH}_3$  menjadi  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

**Tabel 6.** Pengaruh Reaksi Kimia Atmosfer terhadap Lingkungan

Reaksi	Dampak Lingkungan
Pembentukan ozon troposfer	Polusi udara, iritasi pernapasan, kerusakan tanaman

Reaksi	Dampak Lingkungan
Perusakan ozon stratosfer	Peningkatan sinar UV-B, risiko kanker kulit
Pembentukan hujan asam	Kerusakan tanah, air tawar, bangunan
Oksidasi senyawa organik	Pembentukan senyawa toksik sekunder
Pembentukan aerosol sekunder	Memengaruhi iklim, kesehatan, visibilitas

Sumber : Data Primer, 2025

### E. Polutan Udara dan Dampaknya

Polutan udara adalah zat atau partikel yang hadir di atmosfer dalam konsentrasi yang cukup tinggi sehingga dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia, hewan, tumbuhan, serta lingkungan secara umum (Manisalidis dkk., 2020). Polutan ini dapat berasal dari sumber alami (seperti letusan gunung api, kebakaran hutan, dan debu tanah) maupun dari aktivitas manusia (seperti pembakaran bahan bakar fosil, kegiatan industri, transportasi, dan pertanian).

#### Jenis-Jenis Polutan Udara Utama

1. Partikulat (PM10 dan PM2.5)
  - a Partikulat tersuspensi adalah campuran kompleks partikel padat dan cair di udara.
  - b PM10: Diameter < 10 mikrometer; bisa masuk ke saluran pernapasan atas.

- c PM2.5: Diameter < 2,5 mikrometer; bisa menembus hingga alveoli paru-paru.
  - d Sumber: Emisi kendaraan bermotor, pembakaran biomassa, asap industri, debu jalanan (Safar dkk., 2024).
2. Karbon Monoksida (CO)
- a Gas tidak berwarna dan tidak berbau yang beracun.
  - b Sumber: Pembakaran tidak sempurna dari bahan bakar fosil.
  - c Bahaya: Menghambat pengikatan oksigen pada hemoglobin darah → hipoksia.
3. Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>)
- a Gas berwarna coklat kemerahan yang bersifat iritan.
  - b Sumber: Emisi kendaraan bermotor, pembangkit listrik, proses pembakaran.
  - c Dampak: Menyebabkan peradangan saluran pernapasan, membentuk ozon troposfer.
4. Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>)
- a Gas berbau tajam hasil pembakaran batu bara dan minyak bumi yang mengandung sulfur.
  - b Sumber: Industri, pembangkit listrik, vulkanisme.
  - c Dampak: Iritasi saluran napas, pembentukan hujan asam.
5. Ozon Troposfer (O<sub>3</sub>)

- a Bukan hasil emisi langsung, tetapi terbentuk dari reaksi fotokimia antara NO<sub>x</sub> dan senyawa organik volatil (VOC) di bawah sinar matahari.
  - b Dampak: Merusak jaringan paru, menurunkan fungsi paru, memperburuk asma.
6. Senyawa Organik Volatil (VOCs)
- a Senyawa kimia yang mudah menguap dan bereaksi di udara membentuk ozon troposfer.
  - b Sumber: Pelarut cat, bahan bakar, emisi industri, kendaraan bermotor.
  - c Dampak: Bersifat karsinogenik (misalnya benzena), iritasi mata dan saluran napas.
7. Logam Berat (Pb, Hg, Cd, As)
- a Sumber: Pembakaran bensin bertimbal (Pb), emisi industri, limbah elektronik.
  - b Dampak:
    - i Pb (Timbal): Kerusakan sistem saraf, khususnya pada anak-anak.
    - ii Hg (Merkuri): Gangguan neurologis dan fungsi ginjal.
    - iii Cd (Kadmium): Gangguan paru-paru, ginjal, dan tulang.
    - iv As (Arsenik): Bersifat karsinogenik dan mempengaruhi sistem imun.

## Dampak Polutan Udara

### 1. Dampak terhadap Kesehatan Manusia

- a Akut: Sesak napas, batuk, iritasi mata dan tenggorokan, peningkatan serangan asma.
  - b Kronis: Bronkitis kronik, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), kanker paru-paru, kerusakan sistem saraf pusat, gangguan kognitif, dan penyakit kardiovaskular.
  - c Kelompok rentan: Anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan atau jantung lebih mudah terdampak.
2. Dampak terhadap Lingkungan
- a Hujan asam: Pembentukan asam sulfat dan asam nitrat dari  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x \rightarrow$  kerusakan hutan, tanah, bangunan bersejarah, dan perairan.
  - b Efek rumah kaca: Gas seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , dan  $\text{N}_2\text{O}$  meningkatkan pemanasan global  $\rightarrow$  perubahan iklim.
  - c Kerusakan ozon stratosfer: Meskipun berbeda dari ozon troposfer, pelepasan CFC menyebabkan penipisan lapisan ozon pelindung Bumi dari UV.
  - d Penurunan kualitas air dan tanah: Endapan partikel dan logam berat dapat mencemari ekosistem darat dan perairan.
3. Dampak terhadap Tumbuhan dan Hewan
- a Menurunkan fotosintesis karena penyumbatan stomata oleh partikulat.
  - b Tumbuhan rentan mengalami klorosis dan nekrosis daun.
  - c Hewan mengalami gangguan pernapasan dan bioakumulasi logam berat dalam jaringan tubuh.

## Proses Pembentukan Asam Hujan

Asam hujan adalah fenomena turunnya presipitasi (hujan, salju, kabut, embun) yang memiliki tingkat keasaman (pH) di bawah normal, yaitu kurang dari pH 5,6 (Sedyaaaw dkk., 2024). Normalnya, air hujan sedikit asam karena larutnya karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) di atmosfer yang membentuk asam karbonat lemah ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Namun, asam hujan terjadi ketika di atmosfer terdapat polutan gas bersifat asam seperti sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dan nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) yang berasal dari aktivitas manusia, sehingga meningkatkan keasaman hujan secara signifikan.

### 1. Sumber Gas Penyebab Asam Hujan

#### a Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ )

Asal: Pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur (batu bara, minyak bumi), proses industri (smelter logam), dan letusan gunung berapi.

#### b Nitrogen Oksida ( $\text{NO}$ dan $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ )

Asal: Emisi kendaraan bermotor, pembangkit listrik, proses pembakaran suhu tinggi di industri dan mesin pembakaran internal.

### 2. Reaksi Kimia Pembentukan Asam Hujan

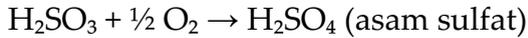
#### a Reaksi pembentukan asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) dari $\text{SO}_2$ :

$\text{SO}_2$  (gas) +  $\text{O}_2$  (gas)  $\rightarrow$   $\text{SO}_3$  (gas) [dengan bantuan sinar matahari atau katalis]

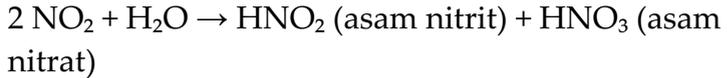
$\text{SO}_3$  (gas) +  $\text{H}_2\text{O}$  (uap air)  $\rightarrow$   $\text{H}_2\text{SO}_4$  (asam sulfat)

#### b Alternatif reaksi langsung:

$\text{SO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$   $\rightarrow$   $\text{H}_2\text{SO}_3$  (asam sulfit)



- c Reaksi pembentukan asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ) dari  $\text{NO}_x$ :



$\text{NO}$  juga dapat bereaksi lebih lanjut menjadi  $\text{NO}_2$  dan kemudian ke  $\text{HNO}_3$ :



### 3. Proses Transportasi dan Presipitasi

- Emisi ke Atmosfer: Gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dilepaskan ke atmosfer dari sumber antropogenik (manusia) maupun alami.
- Transformasi Kimia: Gas-gas ini mengalami oksidasi dan bereaksi dengan uap air membentuk asam kuat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{HNO}_3$ ).
- Pembentukan Awan Asam: Asam-asam tersebut larut dalam butir air di awan atau membentuk aerosol asam.
- Presipitasi: Awan yang mengandung asam ini jatuh sebagai hujan, kabut, salju, atau embun  $\rightarrow$  presipitasi asam.

**Tabel 7.** Dampak Asam Hujan

Aspek Terdampak	Dampak Asam Hujan
Tumbuhan	Merusak daun, menghambat fotosintesis, mengubah pH tanah $\rightarrow$ kekurangan hara

Aspek Terdampak	Dampak Asam Hujan
Perairan	Menurunkan pH sungai/danau → kematian organisme air (ikan, plankton)
Manusia	Tidak langsung, tetapi melalui konsumsi air/ikan yang terkontaminasi logam berat
Bangunan	Korosi pada logam, pelapukan bangunan batu kapur, patung dan cagar budaya
Tanah	Meningkatkan pelarutan logam berat → keracunan tanah dan air bawah tanah

Sumber : Data Primer, 2025

### Upaya Pencegahan dan Pengendalian

1. Regulasi emisi industri: Menggunakan scrubber  $\text{SO}_2$ , catalytic converter untuk  $\text{NO}_x$ .
2. Transisi energi: Beralih dari batu bara ke energi terbarukan.
3. Transportasi ramah lingkungan: Kendaraan listrik, pengurangan kendaraan berbahan bakar fosil.
4. Pemantauan kualitas udara: Menggunakan data satelit dan stasiun pengukur kualitas udara.
5. Rehabilitasi lingkungan: Menetralkan tanah dengan kapur (liming) dan restorasi vegetasi.

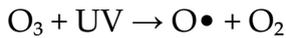
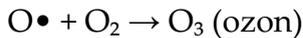
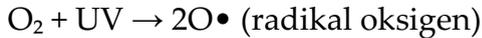
### Penipisan Lapisan Ozon

Penipisan lapisan ozon adalah penurunan konsentrasi ozon ( $\text{O}_3$ ) di stratosfer, khususnya pada ketinggian 10–50 km dari permukaan bumi, yang menyebabkan meningkatnya

radiasi ultraviolet (UV-B) yang mencapai permukaan bumi (Chipperfield dkk., 2017). Ozon berfungsi sebagai pelindung alami bumi dengan menyerap sebagian besar sinar ultraviolet berbahaya dari matahari. Penipisan lapisan ozon menyebabkan risiko besar terhadap kesehatan manusia, ekosistem, serta iklim global (Antarissubhi dkk., 2023).

### 1. Lapisan Ozon dan Fungsi Utamanya

- a Lapisan ozon berada di stratosfer dan mengandung sekitar 90% dari total ozon atmosfer.
- b Ozon terbentuk dan terurai secara alami melalui reaksi kimia yang disebut siklus ozon-oksigen Chapman, yaitu:



- c Fungsi utama ozon adalah menyerap sinar UV-B dan sebagian UV-C dari matahari, mencegah kerusakan DNA makhluk hidup.

### 2. Zat Perusak Ozon (Ozone-Depleting Substances / ODS)

Zat-zat ini umumnya mengandung klorin (Cl), bromin (Br), atau halogen lain, dan stabil di troposfer, tetapi terurai oleh sinar UV di stratosfer sehingga melepaskan atom bebas yang merusak ozon.

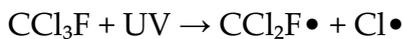
**Tabel 8. Zat Penyusun Ozon**

Jenis Zat Perusak	Contoh	Penggunaan
CFCs	Freon-11 (CFC-11), CFC-12	Lemari es, AC, aerosol, pembersih
HCFCs	HCFC-22, HCFC-123	Refrigeran generasi baru (sementara)
Halons	Halon-1211, Halon-1301	Alat pemadam api
Carbon tetrachloride	CCl <sub>4</sub>	Pelarut industri
Methyl bromide	CH <sub>3</sub> Br	Fumigasi pertanian

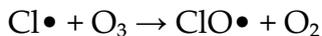
Sumber : Data Primer, 2025

### 3. Mekanisme Kimia Penipisan Ozon oleh CFC

- a CFC naik ke stratosfer dan terurai oleh sinar UV:



- b Radikal bebas klorin (Cl•) sangat reaktif dan menyerang molekul ozon



- c Satu atom Cl• bisa menghancurkan >100.000 molekul ozon karena terus beregenerasi.
- d Reaksi serupa terjadi dengan Br• dari halon, bahkan 10–50 kali lebih merusak dibanding klorin

#### 4. Dampak Penipisan Lapisan Ozon

**Tabel 9.** Dampak Utama Penipisan Lapisan Ozon

Dampak Utama	Penjelasan
Kesehatan manusia	Meningkatkan risiko kanker kulit, katarak, kerusakan DNA, penurunan imunitas
Hewan	Kerusakan jaringan pada hewan laut, terutama plankton dan larva ikan
Tumbuhan	Menurunkan produktivitas tanaman, menghambat fotosintesis
Material	Degradasi plastik, cat, dan bahan bangunan lainnya akibat UV
Iklim	Beberapa ODS juga merupakan gas rumah kaca kuat → kontribusi pemanasan global

Sumber : Data Primer, 2025

#### F. Fenomena Lubang Ozon

1. Lubang ozon adalah daerah dengan konsentrasi ozon sangat rendah, pertama kali terdeteksi di atas Antartika pada 1985.
2. Terjadi setiap musim semi karena kombinasi suhu dingin, awan stratosfer kutub (PSC), dan sinar UV yang kembali menyinari kutub:
  - a. PSC menyediakan permukaan reaksi bagi  $\text{Cl}_2$  dan  $\text{Br}_2$ .

- b Saat matahari kembali muncul (awal musim semi),  $\text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{Cl}\bullet \rightarrow$  penghancuran ozon secara besar-besaran.
3. Lubang ozon Antartika telah mencapai luas maksimum lebih dari 25 juta  $\text{km}^2$  pada puncaknya.

## G. Upaya Internasional Penanggulangan

### 1. Protokol Montreal (1987)

- a Perjanjian global untuk mengurangi dan menghapuskan penggunaan ODS.
- b Telah diadopsi oleh hampir semua negara di dunia.

### 2. Hasil Protokol

- a Konsentrasi CFC dan HCFC telah menurun sejak 2000.
- b Proyeksi pemulihan lapisan ozon pada pertengahan abad ke-21 jika upaya terus berlanjut.

### 1. Gas Rumah Kaca dan Pemanasan Global

#### a Pengertian Gas Rumah Kaca (GRK)

Gas rumah kaca (Greenhouse Gases / GHGs) adalah gas-gas di atmosfer yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah (panas) yang dipancarkan oleh permukaan bumi (Jain dkk., 2015). Fenomena ini disebut efek rumah kaca, yang secara alami mempertahankan suhu bumi agar layak huni. Namun, peningkatan konsentrasi GRK akibat aktivitas manusia menyebabkan pemanasan global (global warming), yaitu

naiknya suhu rata-rata permukaan bumi secara signifikan dan terus-menerus.

b Jenis-Jenis Gas Rumah Kaca

**Tabel 10.** Sumber dan Potensi Pemanasan Global Gas Rumah Kaca

Gas Rumah Kaca	Sumber Utama	Potensi Pemanasan Global (GWP, 100 tahun)
Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> )	Pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi	1 (sebagai acuan)
Metana (CH <sub>4</sub> )	Peternakan, sawah, TPA, produksi minyak & gas	25
Dinitrogen Oksida (N <sub>2</sub> O)	Pertanian (pupuk), pembakaran biomassa	298
CFCs & HCFCs	AC, lemari es, aerosol (bahan sintetis)	1.000 – 10.000+
Ozon Troposfer (O <sub>3</sub> )	Reaksi kimia NO <sub>x</sub> + VOC (di troposfer)	Variabel (kontributor sekunder)
Uap Air (H <sub>2</sub> O)	Penguapan alami, diperkuat	Tidak dihitung dalam GWP

Gas Rumah Kaca	Sumber Utama	Potensi Pemanasan Global (GWP, 100 tahun)
	oleh GRK lainnya	(bersifat amplifikasi)

Sumber : Data Primer, 2025

GWP: Global Warming Potential – ukuran relatif kemampuan suatu gas memerangkap panas dibanding CO<sub>2</sub>.

### c Mekanisme Efek Rumah Kaca dan Pemanasan Global

- i Radiasi matahari (UV dan cahaya tampak) masuk ke atmosfer bumi.
- ii Permukaan bumi menyerap energi ini dan memancarkannya kembali sebagai radiasi inframerah (panas).
- iii Sebagian panas ini ditangkap oleh molekul GRK di atmosfer → dipantulkan kembali ke permukaan bumi.
- iv Peningkatan GRK menyebabkan panas lebih banyak terperangkap → suhu global meningkat.

Ilustrasi sederhananya seperti kaca rumah kaca di kebun: sinar masuk, tapi panas tidak bisa keluar dengan mudah.

### d Dampak Pemanasan Global

- i Dampak Lingkungan
  - 1) Pencairan es di kutub dan gletser → naiknya permukaan laut.

- 2) Perubahan pola iklim → musim tanam terganggu, banjir dan kekeringan lebih sering.
- 3) Kerusakan ekosistem → punahnya spesies yang tak mampu beradaptasi (terumbu karang, satwa kutub).
- 4) Perubahan arus laut dan sirkulasi atmosfer.

ii Dampak Sosial dan Ekonomi

- 1) Ancaman terhadap ketahanan pangan akibat gagal panen dan degradasi lahan.
- 2) Peningkatan risiko penyakit tropis seperti malaria dan demam berdarah karena perluasan habitat nyamuk.
- 3) Kerusakan infrastruktur akibat bencana alam (banjir, badai, kebakaran hutan) (Yunus dkk., 2024).
- 4) Migrasi iklim (climate refugee) dari wilayah pesisir atau kekeringan ekstrem.

iii Dampak di Indonesia

- 1) Negara kepulauan → sangat rentan terhadap kenaikan muka laut.
- 2) Perubahan iklim memperparah kebakaran hutan gambut, krisis air bersih, dan kerugian pertanian.

**e Sumber Emisi GRK Berdasarkan Sektor**

**Tabel 11.** Sumber Emisi Gas Rumah Kaca

Sektor Penyumbang Emisi	Contoh Aktivitas
Energi	PLTU batu bara, kendaraan bermotor, industri, rumah tangga
Pertanian & Peternakan	Metana dari fermentasi enterik sapi, pupuk nitrogen
Kehutanan	Deforestasi, kebakaran hutan → melepaskan karbon tersimpan
Limbah	Tempat pembuangan akhir, limbah cair rumah tangga & industri
Industri	Produksi semen, baja, kimia → melepaskan CO <sub>2</sub> dan gas buatan (CFC)

Sumber : Data Primer, 2025

#### **f Upaya Mitigasi Gas Rumah Kaca**

- i Transisi Energi:
  - 1) Energi terbarukan: surya, angin, air, bioenergi.
  - 2) Efisiensi energi, bangunan hemat energi.
- ii Konservasi Hutan dan Lahan:

Reboisasi, moratorium pembalakan liar, perlindungan gambut.
- iii Pertanian Berkelanjutan:

Pengelolaan pupuk, pakan rendah emisi, teknologi pertanian presisi.

iv Transportasi Rendah Emisi:

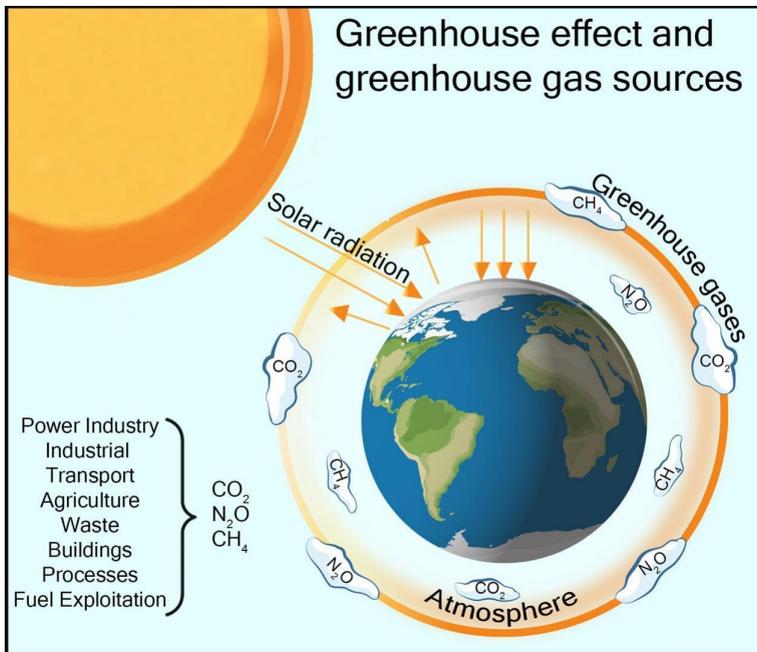
Kendaraan listrik, transportasi publik, pengurangan BBM fosil.

v Pengelolaan Limbah:

Daur ulang, pemanfaatan gas metana dari TPA, pengolahan air limbah (Betaubun dkk., 2025).

vi Perjanjian Internasional:

Protokol Kyoto (1997) dan Perjanjian Paris (2015) menargetkan penurunan emisi global



agar suhu tidak naik lebih dari  $1,5\text{--}2^\circ\text{C}$  dibanding era pra-industri.

Gambar 3. Gas Rumah Kaca dan Penyebabnya (Filonchyk dkk., 2024).

## 2. Teknik Analisis Polusi Udara

### **Pengertian Analisis Polusi Udara**

Analisis polusi udara adalah rangkaian metode ilmiah yang digunakan untuk mengidentifikasi, mengukur, memantau, dan mengevaluasi konsentrasi dan komposisi polutan di atmosfer (Xie dkk., 2017). Tujuan utama dari analisis ini adalah:

- a Mengetahui tingkat pencemaran udara.
- b Mengidentifikasi sumber dan jenis polutan.
- c Menilai dampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan.
- d Memberikan dasar pengambilan kebijakan pengendalian kualitas udara.

### **Klasifikasi Teknik Analisis Polusi Udara (Hidayat dkk., 2023).**

Analisis polusi udara dapat dilakukan melalui tiga pendekatan utama:

- a Pengambilan Sampel Udara (Sampling)
- b Analisis Laboratorium (Laboratory Analysis)
- c Pemantauan Langsung dan Real-Time (Continuous Monitoring System)

**Tabel 12.** Jenis Teknik Analisis Polutan Berdasarkan Wujud

Wujud Polutan	Contoh Polutan	Teknik Analisis Umum Digunakan
Gas	CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , VOCs	Gas chromatography, spektrofotometri, sensor elektrokimia
Partikulat	PM10, PM2.5, debu jalan, jelaga	Gravimetri, beta-ray attenuation, optical scattering
Logam berat	Pb, Hg, Cd, As	AAS, ICP-MS, XRF

Sumber : Data Primer, 2025

### Teknik-Teknik Analisis Polusi Udara

- a Gravimetri (Metode Timbang)
  - i Digunakan untuk: Mengukur konsentrasi partikulat (PM10/PM2.5).
  - ii Prinsip: Sampel udara dilewatkan melalui filter, lalu filter ditimbang sebelum dan sesudah pengambilan.
  - iii Kelebihan: Akurat untuk beban partikel total.
  - iv Kelemahan: Tidak memberikan informasi komposisi kimia partikel.
- b Spektrofotometri UV-Vis
  - i Digunakan untuk: Mengukur NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan ozon.

- ii Prinsip: Berdasarkan absorpsi cahaya oleh molekul pada panjang gelombang tertentu.
- iii Contoh:  $\text{NO}_2$  menyerap pada panjang gelombang 400–450 nm.
- c Sensor Elektrokimia
  - i Digunakan untuk: Mengukur  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  secara real-time.
  - ii Prinsip: Reaksi elektrokimia pada elektroda menghasilkan arus listrik yang sebanding dengan konsentrasi gas.
  - iii Umum dipakai pada: Stasiun pemantauan portabel dan wearable devices.
- d Gas Chromatography (GC)
  - i Digunakan untuk: Analisis VOCs seperti benzena, toluena.
  - ii Prinsip: Memisahkan senyawa gas berdasarkan waktu retensinya di dalam kolom kromatografi.
  - iii Dapat dikombinasikan dengan: Mass Spectrometry (GC-MS) untuk identifikasi senyawa kompleks.
- e Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
  - i Digunakan untuk: Analisis logam berat ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Hg}$ ) dari udara atau filter partikulat.
  - ii Prinsip: Atom logam menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu.
  - iii Kelebihan: Sangat sensitif.

- f Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)
  - i Digunakan untuk: Analisis logam berat dan elemen jejak dengan sensitivitas tinggi.
  - ii Prinsip: Atom diionisasi dalam plasma, lalu dianalisis massanya.
  - iii Cocok untuk: Penelitian lingkungan lanjutan dan kontrol kualitas.
- g X-Ray Fluorescence (XRF)
  - i Digunakan untuk: Analisis komposisi kimia partikulat pada filter.
  - ii Prinsip: Eksitasi atom oleh sinar-X menghasilkan sinyal fluoresen karakteristik.
- h Optical Scattering (Nephelometer, LIDAR)
  - i Digunakan untuk: Mengukur konsentrasi partikel berdasarkan hamburan cahaya.
  - ii Kelebihan: Pengukuran cepat dan non-destruktif.
  - iii LIDAR: Dapat digunakan untuk pemetaan vertikal dan spasial polutan secara real-time.

### **Pemantauan Kualitas Udara Secara Real-Time**

- a AQMS (Air Quality Monitoring System)
  - i Sistem stasiun tetap yang mengukur berbagai parameter (PM, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) secara kontinyu.
  - ii Terhubung ke sistem pelaporan nasional seperti ISPU (Indeks Standar Pencemar Udara) di Indonesia.

- b Pemantauan Mobile
  - i Menggunakan alat portabel yang ditempatkan di kendaraan atau drone.
  - ii Cocok untuk studi spasial atau kawasan rentan seperti industri, kawasan padat lalu lintas.
- c Remote Sensing (Satelit)
  - i Satelit seperti NASA's MODIS, TROPOMI (Sentinel-5P), dan GOSAT digunakan untuk mendeteksi sebaran polusi udara global.
  - ii Data satelit membantu model prediksi iklim dan peringatan dini.

**Teknik Analisis Statistik dan Model Prediktif**

- a Interpolasi Spasial: Kriging, IDW untuk membuat peta distribusi polusi.
- b Model Dispersi Udara: AERMOD, CALPUFF → memodelkan penyebaran polutan.
- c Time Series Analysis: ARIMA, Prophet → memprediksi tren pencemaran udara.
- d Machine Learning: Digunakan dalam prediksi indeks kualitas udara berdasarkan data sensor.

**Tabel 13.** Standar dan Regulasi

Standar Referensi	Digunakan untuk
SNI ISO 4221:2017	Penentuan NO <sub>2</sub> dalam udara ambien
Permen LH No. 12 Tahun 2010	Tata cara pemantauan kualitas udara ambien

Standar Referensi	Digunakan untuk
WHO Air Quality Guidelines	Panduan global ambang batas aman polusi udara
EPA Methods (USA)	Standar internasional metode sampling & analisis

Sumber : Data Primer, 2025

## H. Penutup

Kimia lingkungan sebagai cabang ilmu yang mempelajari interaksi antara senyawa kimia dengan komponen lingkungan hidup telah memberikan landasan penting dalam memahami dinamika pencemaran dan perubahan kualitas lingkungan. Melalui pendekatan interdisipliner yang mencakup prinsip-prinsip kimia, biologi, fisika, serta ilmu lingkungan, kajian ini memungkinkan analisis yang komprehensif terhadap keberadaan, transformasi, dan dampak zat-zat kimia di atmosfer, perairan, tanah, dan biosfer.

Dengan memahami dasar-dasar kimia lingkungan, kita dapat mengevaluasi secara ilmiah berbagai permasalahan ekologis yang dihadapi masyarakat modern, seperti pencemaran udara, air, dan tanah, efek rumah kaca, hujan asam, hingga penipisan lapisan ozon. Hal ini menjadi dasar yang kuat bagi penyusunan strategi mitigasi dan kebijakan berbasis bukti ilmiah dalam pengelolaan lingkungan. Selain itu, kimia lingkungan berperan penting dalam mendorong inovasi teknologi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Oleh karena itu, penguasaan konsep kimia lingkungan tidak hanya relevan dalam konteks akademik, tetapi juga

krusial dalam implementasi nyata di berbagai sektor, termasuk industri, pertanian, energi, dan tata kelola wilayah. Dengan komitmen bersama dalam menjaga integritas lingkungan melalui pendekatan ilmiah, diharapkan tercipta keseimbangan antara pembangunan dan kelestarian alam demi masa depan yang lebih sehat dan berkelanjutan.

# BAB 2

## Kimia Air dan Pencemaran Air

### A. Pendahuluan

Air merupakan komponen esensial dalam kehidupan di bumi. Sekitar 71% permukaan bumi ditutupi oleh air, namun hanya sekitar 2.5% yang berupa air tawar, dan sebagian besar tersimpan dalam bentuk es atau air tanah yang sulit diakses (UNESCO, 2021). Air memainkan peran krusial sebagai pelarut universal dalam reaksi kimia, medium transportasi nutrisi dan zat sisa dalam organisme hidup, serta sebagai penunjang proses industri dan pertanian. Oleh karena itu, ketersediaan air dalam jumlah dan kualitas yang memadai menjadi indikator penting dalam pembangunan berkelanjutan.

Namun, seiring dengan peningkatan populasi, urbanisasi, dan aktivitas industri, kualitas air permukaan dan air tanah semakin terancam oleh pencemaran. Laporan *World Water Development Report* (UNESCO, 2024) menunjukkan bahwa lebih dari dua miliar orang di dunia tidak memiliki akses terhadap air minum yang aman. Di negara berkembang, lebih dari 80% limbah domestik dan industri dibuang langsung ke badan air tanpa melalui proses pengolahan yang memadai. Di Indonesia sendiri, data Kementerian Lingkungan Hidup dan

Kehutanan (KLHK) menunjukkan bahwa banyak sungai utama mengalami pencemaran berat, terutama akibat limbah rumah tangga dan industri (KLHK, 2023).

Pencemaran air adalah kondisi di mana kualitas air menurun akibat masuknya zat asing yang merugikan makhluk hidup dan lingkungan. Zat pencemar bisa berupa bahan organik (limbah domestik, senyawa karbon), anorganik (logam berat, garam, nutrisi seperti nitrat dan fosfat), mikroorganisme patogen, serta *emerging pollutants* seperti obat-obatan, kosmetik, dan mikroplastik (Ganguly et al., 2021). Dampaknya tidak hanya terbatas pada pencemaran lingkungan, tetapi juga berkontribusi pada penyebaran penyakit, gangguan hormon, dan keracunan kronis pada manusia serta penurunan keanekaragaman hayati di ekosistem akuatik.

Dalam konteks inilah, **kimia lingkungan air** memiliki peranan yang sangat penting. Ilmu kimia memungkinkan kita memahami sifat fisik dan kimia air, mengidentifikasi jenis dan konsentrasi pencemar, serta merancang teknologi untuk mengolah dan memulihkan kualitas air. Misalnya, melalui analisis kimia, kita dapat menentukan parameter seperti pH, BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), logam berat, dan senyawa organik volatil. Pengetahuan tentang reaksi kimia dalam air juga mendasari proses pengolahan seperti koagulasi, presipitasi, adsorpsi, hingga biodegradasi senyawa pencemar (Khan et al., 2022).

Lebih jauh lagi, pendekatan kimia tidak hanya digunakan dalam laboratorium, tetapi juga dalam pengambilan kebijakan berbasis bukti. Misalnya, standar baku mutu air yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 menggunakan parameter kimia

sebagai dasar untuk menentukan apakah suatu badan air dikategorikan bersih, tercemar ringan, atau tercemar berat.

## **B. Sifat Kimia dan Fisika Air**

### **1. Struktur Molekul dan Ikatan Hidrogen**

Air ( $H_2O$ ) adalah senyawa kimia paling penting di biosfer, dengan struktur molekul yang khas dan sangat menentukan sifat-sifat fisika dan kimianya. Setiap molekul air terdiri atas satu atom oksigen yang berikatan secara kovalen dengan dua atom hidrogen, membentuk sudut sekitar  $104.5^\circ$ . Konfigurasi ini menciptakan momen dipol yang kuat karena perbedaan elektronegativitas antara oksigen dan hidrogen, menjadikan air sebagai pelarut polar yang sangat efektif (Chaplin, 2021).

Ikatan hidrogen antarmolekul air menyebabkan sifat kohesi dan adhesi yang tinggi. Ikatan ini juga bertanggung jawab atas anomali sifat fisika air, seperti titik didih yang tinggi dibandingkan dengan molekul sejenis lainnya, tegangan permukaan yang besar, dan kemampuan menstabilkan suhu lingkungan melalui kapasitas kalor spesifik yang tinggi (Ball, 2020). Sifat-sifat ini mendukung fungsi ekologis air dalam mempertahankan stabilitas termal di ekosistem perairan.

### **2. Parameter Kimia dan Fisika yang Menentukan Kualitas Air**

Evaluasi kualitas air dalam konteks lingkungan sangat dipengaruhi oleh parameter fisika dan kimia yang diukur melalui uji laboratorium. Parameter-parameter ini tidak hanya mencerminkan kondisi fisik air, tetapi juga menunjukkan keberadaan polutan, tingkat

oksidasi, serta aktivitas biologis di dalam air. Beberapa parameter utama antara lain:

a **pH (*Potential of Hydrogen*)**

pH mengukur konsentrasi ion hidrogen ( $H^+$ ) dalam air, menentukan apakah air bersifat asam, netral, atau basa. pH air alami biasanya berkisar antara 6,5–8,5. Nilai pH dipengaruhi oleh  $CO_2$  terlarut, aktivitas mikroorganisme, dan adanya kontaminan kimia. Perubahan ekstrem pada pH dapat mengganggu keseimbangan biologis dan mempercepat pelarutan logam berat (El-Serehy et al., 2022).

b **DO (*Dissolved Oxygen*)**

DO menunjukkan jumlah oksigen terlarut dalam air yang tersedia untuk respirasi organisme akuatik. Nilai DO yang tinggi menunjukkan kondisi yang sehat, sedangkan nilai rendah ( $< 3$  mg/L) menandakan pencemaran organik atau eutrofikasi. DO dapat dipengaruhi oleh suhu, turbulensi, dan aktivitas mikroba dekomposer.

c **BOD (*Biochemical Oxygen Demand*)**

BOD mengukur kebutuhan oksigen oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik selama periode inkubasi tertentu (biasanya 5 hari). Nilai BOD tinggi menunjukkan banyaknya bahan organik dalam air yang dapat menyebabkan deplesi oksigen dan kematian organisme akuatik.

d **COD (*Chemical Oxygen Demand*)**

COD adalah ukuran jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi semua senyawa organik dalam air secara kimiawi. Meskipun lebih cepat dari BOD, COD tidak membedakan antara senyawa *biodegradable* dan *non- biodegradable*. Keduanya digunakan secara komplementer untuk menggambarkan pencemaran organik.

e ***TSS (Total Suspended Solids) dan TDS (Total Dissolved Solids)***

TSS adalah partikel padat tersuspensi dalam air yang dapat menyebabkan kekeruhan dan mempengaruhi penetrasi cahaya. Sementara TDS mencakup semua garam, mineral, dan logam terlarut dalam air. Konsentrasi TSS dan TDS yang tinggi dapat mengganggu fotosintesis organisme akuatik dan menunjukkan adanya pencemaran, baik dari limpasan pertanian maupun limbah industri (Wang et al., 2023).

### **3. Peran Kimia Air dalam Sistem Perairan Alami**

Kimia air memainkan peran penting dalam pengaturan keseimbangan biologis dan geokimia perairan. Dalam ekosistem sungai, danau, dan laut, reaksi kimia seperti fotosintesis, respirasi, oksidasi-reduksi, dan dekomposisi organik berlangsung secara kontinu. Proses-proses ini mempengaruhi ketersediaan nutrisi, kestabilan pH, dan kandungan oksigen dalam air.

Sebagai contoh, keseimbangan karbonat-bikarbonat dalam air berperan dalam sistem buffer alami untuk menjaga kestabilan pH. Reaksi antara  $\text{CO}_2$  terlarut dan air membentuk asam karbonat yang dapat terionisasi

menjadi ion bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) dan karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Sistem ini sangat penting dalam menghadapi perubahan pH akibat pencemaran atau respirasi organisme (Zeebe, 2022).

Selain itu, kimia air juga berfungsi dalam menetralkan polutan melalui proses alami seperti presipitasi logam berat, adsorpsi ion oleh partikel tanah liat, atau transformasi biologis oleh mikroorganisme. Namun, kemampuan sistem perairan alami ini memiliki batas. Jika beban pencemaran melebihi kapasitas asimilasi lingkungan, maka akan terjadi akumulasi zat berbahaya yang berpotensi menyebabkan kerusakan ekologis.

Oleh karena itu, pemahaman terhadap sifat fisika dan kimia air sangat penting untuk mendeteksi gangguan awal dalam sistem perairan, serta menjadi dasar untuk perencanaan strategi pengelolaan dan remediasi pencemaran air yang efektif.

### **C. Sumber dan Jenis Pencemar Air**

Air sebagai sumber daya alam yang vital, rentan terhadap berbagai jenis pencemaran yang berasal dari aktivitas manusia. Pencemaran air terjadi ketika zat atau energi asing masuk ke dalam badan air dan menyebabkan perubahan fisik, kimia, atau biologis yang berdampak negatif terhadap organisme hidup dan kualitas lingkungan. Pemahaman terhadap sumber dan jenis pencemar merupakan langkah awal dalam upaya pengendalian dan remediasi pencemaran air secara efektif.

#### **1. Sumber Pencemar Air**

##### **a Limbah Domestik**

Limbah domestik atau rumah tangga merupakan salah satu sumber utama pencemar air, terutama di daerah urban dengan sistem sanitasi yang belum memadai. Limbah ini mengandung bahan organik (sisa makanan, lemak), deterjen, senyawa fosfat, serta mikroorganisme patogen dari kotoran manusia. Ketika dibuang tanpa pengolahan, limbah domestik dapat menyebabkan eutrofikasi, peningkatan BOD, dan penyebaran penyakit berbasis air seperti kolera dan disentri (Rao et al., 2022).

b Limbah Industri

Industri menghasilkan berbagai jenis limbah yang tergantung pada jenis kegiatan produksinya. Industri tekstil, misalnya, menyumbang pewarna sintetis dan logam berat seperti kromium dan timbal; industri makanan menghasilkan limbah organik dengan BOD tinggi; sedangkan industri kimia atau farmasi membuang senyawa kompleks yang sulit terdegradasi (Hasan et al., 2021). Banyak dari senyawa ini bersifat toksik, persisten, dan bioakumulatif sehingga membahayakan organisme akuatik dan manusia.

c Limbah Pertanian

Limbah pertanian terutama berasal dari limpasan (*runoff*) pupuk dan pestisida. Nutrien seperti nitrat dan fosfat yang berlebihan menyebabkan eutrofikasi dan pertumbuhan alga yang berlebihan (*algal bloom*), yang pada gilirannya mengurangi kandungan oksigen terlarut dalam air. Pestisida seperti organofosfat dan karbamat

juga dapat mencemari air tanah dan berdampak pada kesehatan manusia jika masuk ke rantai makanan (Zhang et al., 2023).

## 2. Jenis Pencemar Berdasarkan Sifat Kimia dan Fisika

### a Pencemar Organik

Pencemar organik terdiri dari senyawa berbasis karbon yang mudah terdegradasi (*biodegradable*) maupun yang persisten. Contohnya meliputi bahan organik dari limbah domestik, pestisida, hidrokarbon minyak bumi, dan senyawa organik volatil (VOC). Dampaknya mencakup penurunan DO, peningkatan BOD dan COD, serta risiko toksisitas kronis. Dalam air, senyawa organik ini juga dapat mengalami bioakumulasi dalam jaringan organisme (Singh et al., 2021).

### b Pencemar Anorganik

Pencemar ini mencakup logam berat (seperti arsenik, merkuri, kadmium, timbal), garam anorganik, serta nutrisi seperti nitrat dan fosfat. Logam berat bersifat toksik, tidak dapat terurai secara biologis, dan dapat mengganggu fungsi biologis seperti sistem saraf atau endokrin manusia. Konsentrasi nitrat yang tinggi dalam air minum dapat menyebabkan sindrom "*blue baby*" (*methemoglobinemia*) pada bayi (WHO, 2021).

### c Pencemar Biologis

Pencemar biologis meliputi mikroorganisme patogen seperti bakteri (*E. coli*, *Salmonella*), virus (*hepatitis A*, *rotavirus*), dan parasit (*Giardia*, *Cryptosporidium*). Keberadaan pencemar ini

berkorelasi erat dengan limbah fekal dan sistem sanitasi yang buruk. Risiko utamanya adalah penyebaran penyakit infeksi air melalui konsumsi atau kontak langsung (Ali et al., 2020).

d Pencemar Fisik

Pencemar fisik umumnya berupa padatan tersuspensi (TSS), suhu, dan warna atau kekeruhan. Suspensi seperti lumpur atau pasir dapat berasal dari erosi tanah atau aktivitas konstruksi. Pencemar fisik mempengaruhi kemampuan fotosintesis organisme air, mempercepat pendangkalan badan air, dan menurunkan estetika serta nilai ekonomi perairan (Rahman et al., 2021).

### 3. Tantangan Baru dalam Kimia Lingkungan Air (Emerging Pollutants)

Dalam dua dekade terakhir, perhatian ilmuwan dan regulator meningkat terhadap kelompok pencemar baru yang dikenal sebagai *emerging pollutants (EPs)*. EPs adalah senyawa kimia yang sebelumnya tidak dimonitor secara rutin namun kini ditemukan tersebar luas di lingkungan air dan berpotensi memberikan efek toksik jangka panjang.

a Mikroplastik

Mikroplastik adalah fragmen plastik berukuran <5 mm yang berasal dari degradasi plastik besar atau dari produk konsumen (seperti scrub wajah, ban kendaraan, tekstil sintetis). Mikroplastik ditemukan hampir di semua badan air, termasuk sungai, danau, laut, bahkan air minum (Zhang et al., 2022). Partikel ini dapat membawa racun

seperti PCB, logam berat, dan pestisida serta dimakan oleh organisme akuatik, menimbulkan efek bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan.

b Limbah Farmasi dan Produk Perawatan Pribadi (Pharmaceuticals and Personal Care Products – PPCPs)

PPCPs seperti antibiotik, hormon, analgesik, dan kosmetik kini ditemukan dalam limbah rumah tangga dan limbah rumah sakit. Meski konsentrasinya sangat kecil (ng/L hingga  $\mu\text{g/L}$ ), dampaknya signifikan. Antibiotik dapat menciptakan resistensi bakteri (AMR), sementara hormon seperti estrogen sintetik (EE2) menyebabkan gangguan endokrin dan feminisasi ikan jantan (Kümmerer et al., 2021).

Saat ini, instalasi pengolahan air limbah konvensional belum sepenuhnya mampu mengeliminasi emerging pollutants ini, sehingga diperlukan pendekatan teknologi lanjutan seperti adsorpsi berbasis karbon aktif, fotokatalisis, atau teknologi membran.

#### D. Proses Kimia dalam Perairan

Sistem perairan alami adalah media dinamis tempat berbagai reaksi kimia berlangsung, baik secara spontan maupun dipicu oleh aktivitas biologis dan antropogenik. Reaksi-reaksi kimia ini memainkan peran penting dalam mempertahankan keseimbangan ekosistem akuatik, mendaur ulang unsur hara, serta menentukan nasib polutan. Dalam konteks kimia lingkungan, memahami proses-proses kimia

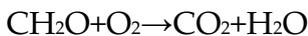
tersebut merupakan kunci dalam menilai dampak pencemaran dan merancang strategi remediasi yang efektif.

### **1. Reaksi Redoks (Oksidasi-Reduksi)**

Reaksi redoks adalah proses utama dalam transformasi zat di lingkungan perairan. Dalam reaksi ini, terjadi perpindahan elektron antara spesies kimia, yang mengubah tingkat oksidasi unsur-unsur tertentu. Misalnya, ion besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ) dapat teroksidasi menjadi  $\text{Fe}^{3+}$  di lingkungan aerobik, kemudian membentuk endapan  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  yang bersifat tidak larut. Hal serupa terjadi pada mangan, arsenik, dan logam berat lainnya (Li et al., 2021).

Reaksi redoks juga menentukan ketersediaan oksigen dalam perairan. Ketika senyawa organik terdegradasi oleh mikroorganisme, oksigen terlarut digunakan sebagai akseptor elektron. Di lingkungan anaerobik, senyawa lain seperti nitrat, sulfat, atau karbonat dapat berperan sebagai akseptor elektron alternatif, yang menghasilkan senyawa seperti amonia, hidrogen sulfida, atau metana (Zhou et al., 2020).

#### **Contoh reaksi redoks:**



Reaksi ini merupakan dekomposisi bahan organik sederhana dalam kondisi aerobik dan mencerminkan kontribusi kimia terhadap penurunan DO dan peningkatan BOD/COD dalam air tercemar.

### **2. Reaksi Netralisasi dan Penyangga (Buffering)**

Air alami memiliki kemampuan untuk menetralkan perubahan pH melalui sistem penyangga (buffer), yang sangat penting untuk menjaga kestabilan kimia

lingkungan akuatik. Sistem buffer karbonat-bikarbonat adalah yang paling umum ditemukan di perairan permukaan dan air tanah.

**Reaksi penyangga karbonat:**



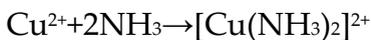
Sistem ini merespons peningkatan atau penurunan pH dengan menyerap atau melepaskan ion  $\text{H}^+$ , menjaga kestabilan lingkungan akuatik terhadap perubahan kimia akibat pencemaran atau aktivitas biologis (Zeebe, 2022).

Dalam perairan yang mengalami pencemaran asam, misalnya akibat hujan asam atau limbah industri, reaksi netralisasi oleh ion bikarbonat sangat krusial untuk mengurangi dampak keasaman terhadap biota air.

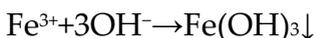
**3. Kompleksasi dan Presipitasi Logam**

Dalam air, logam berat tidak hanya hadir sebagai ion bebas, tetapi juga dapat membentuk kompleks dengan ligan anorganik maupun organik, seperti ion klorida, hidroksida, atau humat. Kompleksasi mempengaruhi kelarutan, mobilitas, dan toksisitas logam dalam air.

**Contoh kompleksasi:**



Reaksi kompleksasi ini dapat meningkatkan atau menurunkan bioavailabilitas logam tergantung pada ligan yang terlibat. Sementara itu, presipitasi terjadi ketika konsentrasi ion melebihi kelarutan produk, seperti dalam pembentukan logam hidroksida:



Reaksi presipitasi digunakan dalam pengolahan air limbah untuk menghilangkan logam berat melalui pengendapan senyawa yang tidak larut (Sánchez et al., 2023).

#### 4. Hidrolisis dan Fotodegradasi

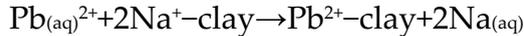
Hidrolisis adalah reaksi antara suatu zat dengan air, biasanya menghasilkan produk yang lebih polar. Banyak senyawa pestisida dan zat kimia industri mengalami degradasi melalui proses hidrolisis, yang dipengaruhi oleh pH dan suhu air. Misalnya, organofosfat seperti diazinon dapat terurai menjadi senyawa yang kurang toksik melalui hidrolisis (Guo et al., 2020).

Selain itu, proses fotodegradasi terjadi ketika sinar UV atau cahaya tampak menyebabkan kerusakan senyawa kimia dalam air. Reaksi ini penting dalam menguraikan senyawa organik seperti farmasi, pewarna, dan senyawa *aromatik polisiklik* (PAHs). Fotodegradasi dapat dipercepat dengan adanya fotokatalis seperti  $\text{TiO}_2$  dalam aplikasi teknologi AOP (*Advanced Oxidation Processes*).

#### 5. Pertukaran Ion dan Adsorpsi

Pertukaran ion adalah proses kimia di mana ion dalam air digantikan oleh ion lain yang terikat pada permukaan padatan, seperti tanah liat atau mineral zeolit. Adsorpsi juga berperan besar dalam mengendalikan pergerakan polutan, terutama logam berat dan senyawa organik. Interaksi ini terjadi antara molekul polutan dengan permukaan partikel tersuspensi atau bahan organik terlarut.

### Contoh:



Adsorpsi dan pertukaran ion menjadi mekanisme penting dalam sistem alami maupun dalam sistem pengolahan air limbah untuk memindahkan kontaminan dari fase larut ke fase padat.

## E. Analisis Kualitas Air

Analisis kualitas air merupakan proses penting dalam kimia lingkungan yang bertujuan untuk menentukan sejauh mana air memenuhi standar kesehatan dan lingkungan. Evaluasi kualitas air dilakukan dengan mengukur berbagai parameter fisika, kimia, dan biologis yang mencerminkan kondisi ekosistem perairan serta dampak potensial terhadap manusia dan makhluk hidup lainnya. Analisis ini tidak hanya penting dalam pemantauan, tetapi juga sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pengelolaan dan remediasi pencemaran.

### 1. Parameter Kualitas Air dan Signifikansinya

Kualitas air ditentukan oleh berbagai parameter yang diklasifikasikan menjadi:

#### a Parameter Fisika

- i Suhu: Mempengaruhi laju reaksi kimia, kelarutan oksigen, dan aktivitas biologis. Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stres termal pada biota air.
- ii Kekeruhan (turbiditas): Menunjukkan jumlah padatan tersuspensi. Kekeruhan tinggi menghambat penetrasi cahaya dan mengganggu fotosintesis.

iii Warna dan bau: Merupakan indikator awal keberadaan bahan organik atau senyawa pencemar tertentu.

b Parameter Kimia

i pH: **Menunjukkan konsentrasi ion hidrogen (H<sup>+</sup>) dalam air.** Rentang normal perairan alami adalah 6,5–8,5. Nilai pH ekstrem dapat mengganggu metabolisme organisme akuatik.

ii DO (Dissolved Oxygen): Kadar oksigen terlarut penting untuk respirasi organisme air. DO rendah (<4 mg/L) menunjukkan kondisi tercemar atau eutrofikasi.

iii BOD (Biochemical Oxygen Demand): Mengukur kebutuhan oksigen mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik. Nilai BOD tinggi mengindikasikan pencemaran organik.

iv COD (Chemical Oxygen Demand): Mengukur total oksidan kimia yang dibutuhkan untuk mengurai bahan organik dan anorganik. COD biasanya lebih tinggi dari BOD.

v TSS (Total Suspended Solids): Padatan tersuspensi yang dapat menurunkan kualitas estetika dan mengganggu respirasi ikan.

vi TDS (Total Dissolved Solids): Total senyawa terlarut, termasuk garam, logam, dan ion lainnya. Nilai TDS tinggi dapat **menurunkan potabilitas air.**

- c Parameter Biologis
  - i Coliform total dan E. coli: **Digunakan sebagai indikator** pencemaran fekal. Keberadaan bakteri ini menunjukkan potensi patogen dalam air.
  - ii Algae atau cyanobacteria: Dapat menandakan eutrofikasi atau **pencemaran nutrisi seperti fosfat dan nitrat.**

## 2. Teknik dan Metodologi Analisis Kimia Air

Berbagai metode digunakan untuk menganalisis kualitas air, tergantung pada jenis parameter yang diuji. Berikut beberapa metode yang umum digunakan:

### a Spektrofotometri

Digunakan untuk mengukur konsentrasi senyawa seperti nitrat, fosfat, dan logam berat berdasarkan absorbansi cahaya oleh senyawa berwarna yang terbentuk dari reaksi kimia spesifik. Misalnya pengukuran nitrat dengan metode asam sulfosalisilat pada panjang gelombang 410 nm (Ali et al., 2021).

### b Titrasi

Metode klasik untuk pengukuran BOD, COD, dan alkalinitas. Misalnya, COD dianalisis dengan titrasi kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) dalam media asam menggunakan indikator ferroin.

### c Elektrokimia

Penggunaan elektroda spesifik seperti:

- i pH meter (elektroda kaca)

- ii DO meter (elektroda membran atau optik)
  - iii *Ion-selective electrode* (ISE) untuk ion seperti ammonium, nitrat, atau fluoride
- d Kromatografi dan Spektrometri Massa
- Teknik ini digunakan untuk mendeteksi polutan dalam konsentrasi rendah seperti pestisida, PPCPs (*Pharmaceutical and Personal Care Products*), dan senyawa organik volatil. Misalnya:
- i GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) untuk pestisida
  - ii LC-MS/MS untuk residu farmasi (Zhang et al., 2022)
- e Gravimetri dan Filtrasi
- Untuk menentukan kadar TSS dan TDS, air disaring dan residu dikeringkan serta ditimbang hingga berat konstan.

### 3. Interpretasi Data dan Indeks Kualitas Air

Setelah pengukuran dilakukan, hasil dianalisis dan dibandingkan dengan nilai baku mutu atau standar yang berlaku. Untuk mempermudah interpretasi, sering digunakan **Indeks Kualitas Air (*Water Quality Index/WQI*)**.

WQI menghitung nilai tunggal berdasarkan beberapa parameter utama (misalnya pH, DO, BOD, TSS, TDS, nitrat, fosfat) dengan bobot tertentu. Skala WQI umumnya sebagai berikut:

- a 91–100 : Sangat baik
- b 71–90 : Baik

- c 51–70 : Sedang
- d 26–50 : Buruk
- e <25 : Sangat buruk

Metode ini memudahkan pemangku kebijakan atau masyarakat umum untuk memahami kondisi kualitas air secara menyeluruh (Khan et al., 2021).

#### 4. Monitoring dan Tren Jangka Panjang

Pemantauan berkala penting untuk melihat dinamika kualitas air dalam jangka panjang, terutama di daerah rawan pencemaran. Data tren dapat digunakan untuk:

- a Menilai efektivitas pengolahan limbah
- b Menentukan musim kritis (misalnya musim hujan dengan limpasan tinggi)
- c Memetakan zona pencemaran
- d Memprediksi risiko kesehatan masyarakat

Saat ini, banyak daerah mulai mengintegrasikan *sensor real-time* dan *teknologi IoT* dalam pemantauan kualitas air untuk meningkatkan efisiensi dan respon cepat terhadap pencemaran (Nguyen et al., 2021).

#### F. Analisis Kualitas Air

Analisis kualitas air merupakan langkah kritis dalam ilmu kimia lingkungan untuk menentukan tingkat pencemaran dan kelayakan air bagi berbagai kebutuhan, termasuk konsumsi manusia, irigasi, dan pelestarian ekosistem. Validitas hasil analisis bergantung pada metodologi yang digunakan, mulai dari teknik pengambilan sampel, penyimpanan, hingga prosedur uji laboratorium. Selain itu,

hasil analisis harus dibandingkan dengan standar kualitas air yang diakui secara nasional maupun internasional.

## 1. Metode Pengambilan dan Penyimpanan Sampel

### a Pengambilan Sampel (Sampling)

Pengambilan sampel yang benar adalah kunci untuk mendapatkan data yang representatif dan akurat. Prosedur pengambilan sampel air harus mempertimbangkan lokasi (hulu, tengah, hilir), waktu (musim kemarau vs musim hujan), kedalaman, dan frekuensi.

#### **Metode sampling yang umum digunakan:**

***Grab Sampling:*** Mengambil satu kali sampel dalam waktu dan tempat tertentu. Cocok untuk analisis cepat dan parameter yang tidak berubah secara drastis (misalnya pH, DO).

***Composite Sampling:*** Menggabungkan beberapa sampel dari lokasi dan/atau waktu berbeda. Digunakan untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih representatif.

***Automatic Sampling:*** Menggunakan alat otomatis untuk mengambil sampel pada interval waktu tertentu, biasanya dalam sistem pemantauan kualitas air jangka panjang (Nguyen et al., 2021).

### b Penyimpanan dan Pengawetan Sampel

Setiap parameter memerlukan metode penyimpanan berbeda untuk menjaga kestabilannya:

**Tabel 14.** Penyimpanan dan Pengawetan

Parameter	Wadah	Pengawetan	Suhu	Lama Simpan
DO	Botol kaca BOD	Analisis langsung	4 °C	≤ 4 jam
pH	Botol plastik	Analisis langsung	-	≤ 6 jam
BOD	Botol gelap BOD	Inkubasi 20 °C	4 °C	≤ 48 jam
COD	Botol plastik	Asidifikasi H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4 °C	≤ 7 hari
Logam berat	Botol plastik PE	Asidifikasi HNO <sub>3</sub> pH <2	4 °C	≤ 6 bulan
Nutrien (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Botol plastik	Asidifikasi atau pembekuan	- 20 °C	≤ 1 bulan

(Sumber: APHA, 2020)

## 2. Parameter Uji Laboratorium

Setelah sampel dikumpulkan, analisis dilakukan menggunakan berbagai teknik kimia analitik. Setiap metode disesuaikan dengan karakteristik parameter yang diukur.

### a Spektrometri

Spektrometri merupakan teknik yang sangat umum dalam analisis air karena sensitivitas dan selektivitasnya yang tinggi. Prinsip dasarnya adalah pengukuran interaksi cahaya dengan materi (absorbansi, emisi, fluoresensi).

**Jenis spektrometri yang digunakan:**

- i **UV-Vis Spectrophotometry:** Untuk analisis nitrat, fosfat, amonia, COD, dan logam yang membentuk kompleks berwarna.
- ii **AAS (Atomic Absorption Spectrophotometry):** Untuk logam berat seperti Pb, Cd, Cu, Zn, Cr.
- iii **ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry):** Sangat sensitif untuk analisis multielement hingga tingkat ppb–ppt (Rashid et al., 2022).

b Kromatografi

Kromatografi digunakan untuk memisahkan dan menganalisis senyawa kompleks, terutama senyawa organik atau emerging pollutants.

**Jenis kromatografi yang digunakan:**

- i **GC (Gas Chromatography):** Untuk senyawa volatil seperti pestisida, senyawa aromatik.
- ii **GC-MS:** Kombinasi dengan spektrometri massa untuk identifikasi akurat senyawa organik mikropolutan.
- iii **HPLC (High Performance Liquid Chromatography):** Untuk senyawa non-volatil seperti residu farmasi, fenol, dan surfaktan.

iv **LC-MS/MS:** Sangat efektif untuk PPCPs dan hormon endokrin (Zhang et al., 2022).

c Titrasi

Metode titrimetri masih luas digunakan karena kesederhanaannya. Beberapa aplikasi meliputi:

i COD: Titrasi dengan dikromat dan indikator ferroin.

ii Klorida: Argentometri (Mohr method).

iii Kesadahan total ( $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ ): Titrasi dengan EDTA menggunakan indikator Eriochrome Black T.

iv Alkalinitas: Titrasi dengan asam kuat  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hingga titik akhir pH 4,5.

d Parameter Biologis (Coliform, E. coli)

Metode MPN (*Most Probable Number*) dan uji membran filtrasi digunakan untuk menentukan jumlah bakteri indikator. Penggunaan medium selektif seperti *MacConkey* agar atau *Chromocult* agar membantu identifikasi secara visual (WHO, 2021).

### 3. Standar Kualitas Air

Interpretasi hasil analisis mengacu pada standar yang telah ditetapkan oleh lembaga nasional dan internasional.

a Peraturan Pemerintah Republik Indonesia

**PP No. 22 Tahun 2021:** Mengatur baku mutu air berdasarkan peruntukannya (kelas I–IV). Misalnya:

Kelas I (air minum):  $BOD \leq 2 \text{ mg/L}$ ,  $COD \leq 10 \text{ mg/L}$ ,  $TSS \leq 50 \text{ mg/L}$

Kelas II (rekreasi dan perikanan):  $BOD \leq 3 \text{ mg/L}$ ,  $COD \leq 25 \text{ mg/L}$

pH semua kelas: 6.0–9.0

b *WHO Guidelines for Drinking-water Quality (2022)*

**Tabel 15.** Parameter dan Batas Maksimum

Parameter	Batas Maksimum
Arsenik	0,01 mg/L
Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ )	50 mg/L
Fluorida	1,5 mg/L
E. coli	0/100 mL
pH	6.5–8.5

c *US EPA Water Quality Standards*

US EPA memberikan pedoman berbasis risiko untuk bahan kimia berbahaya, seperti:

**Lead (Pb):**  $<0,015 \text{ mg/L}$  (drinking water action level)

**Mercury (Hg):**  $<0,002 \text{ mg/L}$

**Total Coliform Rule:** 0 coliform/100 mL untuk sistem air publik

## G. Penutup

Air merupakan komponen esensial dalam kehidupan dan keberlanjutan ekosistem, namun saat ini menghadapi tantangan serius akibat pencemaran yang semakin kompleks dan meluas. Pembahasan dalam bab ini menunjukkan bahwa

pencemaran air bersumber dari berbagai aktivitas manusia, mulai dari domestik, pertanian, hingga industri, yang menghasilkan polutan organik, anorganik, biologis, dan *emerging pollutants* seperti mikroplastik dan residu farmasi.

Secara kimia, air memiliki sifat unik seperti ikatan hidrogen, polaritas tinggi, dan kemampuan melarutkan berbagai zat, yang sekaligus menjadikannya rentan tercemar. Parameter kimia seperti pH, DO, BOD, COD, TDS, dan keberadaan logam berat atau senyawa toksik lainnya merupakan indikator penting dalam menilai kualitas air.

Analisis kualitas air melalui teknik seperti spektrofotometri, kromatografi, titrasi, dan metode biologis memberikan dasar ilmiah untuk mengevaluasi kondisi perairan. Namun, hasil tersebut harus dibandingkan dengan standar baku mutu, baik nasional (PP No. 22/2021) maupun internasional (WHO, EPA).

# Pencemaran Logam Berat

Masalah lingkungan yang berkaitan dengan kontaminasi logam berat menjadi serius di negara-negara berkembang karena peningkatan aktivitas geologi dan antropogenik. Kegiatan ini meningkatkan konsentrasi unsur-unsur ini hingga mencapai jumlah yang berbahaya bagi lingkungan (Chibuike and Obiora, 2014). Pesatnya perkembangan industrialisasi dan tren urbanisasi, peningkatan aktivitas lalu lintas secara substansial berkontribusi terhadap akumulasi logam berat yang dibuang oleh kendaraan di lingkungan.. Polusi logam berat di area pertanian akibat emisi lalu lintas dapat mencemari tanaman yang tumbuh di lingkungan tersebut (Chen *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2012). Tanaman yang tumbuh di tanah ini menunjukkan penurunan pertumbuhan, performa dan hasil panen. Penurunan pertumbuhan sebagai akibat dari perubahan proses fisiologis dan biokimia pada tanaman yang tumbuh di tanah yang tercemar logam berat telah dicatat (Yekeen *et al.*, 2012). Menurunnya pertumbuhan tanaman mengurangi hasil panen yang pada akhirnya menyebabkan kerawanan pangan (Okunola *et al.*, 2007). Di daerah pertanian, penyerapan logam berat melalui sistem tanaman-tanah dapat memainkan peran utama dalam paparan logam berat pada manusia.

Kontaminan logam berat dapat dengan mudah berdampak pada orang-orang yang berada di sekitar sumber

melalui debu yang tersuspensi atau kontak langsung (Yan *et al.*, 2012). Jika ada lahan pertanian dalam cakupan yang dapat dijangkau oleh kontaminan, kontaminan tersebut dapat masuk ke dalam rantai makanan sebagai akibat dari penyerapan oleh tanaman yang dapat dimakan (Bakirdere and Yaman, 2008) sehingga menyebabkan risiko kesehatan yang serius. Karena toksisitasnya (terutama untuk Cd dan Pb), persistensi dan karakteristiknya yang tidak dapat terurai, maka sangat penting untuk memantau konsentrasi logam berat di lingkungan kita.

Pengangkutan logam ke air tanah dari lokasi limbah berbahaya merupakan masalah lingkungan yang cukup besar. Penilaian yang dilakukan oleh EPA pada tahun 1970-an (Scalf *et al.*, 1973; Miller *et al.*, 1974; and Pye and Patrick, 1983) menunjukkan empat polutan yang paling sering ditemukan dalam air tanah: klorida, nitrat, hidrokarbon, dan logam berat. Segera setelah itu penyakit Minamata ditemukan di Jepang, beberapa logam berat lainnya telah ditemukan terakumulasi dalam rantai makanan dan menjadi racun bagi kehidupan akuatik dan terestrial, seringkali pada konsentrasi yang sangat rendah. Sebagian besar sebagai tanggapan terhadap potensi bahaya kesehatan, banyak penelitian telah diarahkan untuk memahami reaksi logam di lingkungan alam. Salah satu aspek terpenting dari penelitian ini adalah upaya untuk menentukan jalur dan nasib akhir dari logam berat di lingkungan.

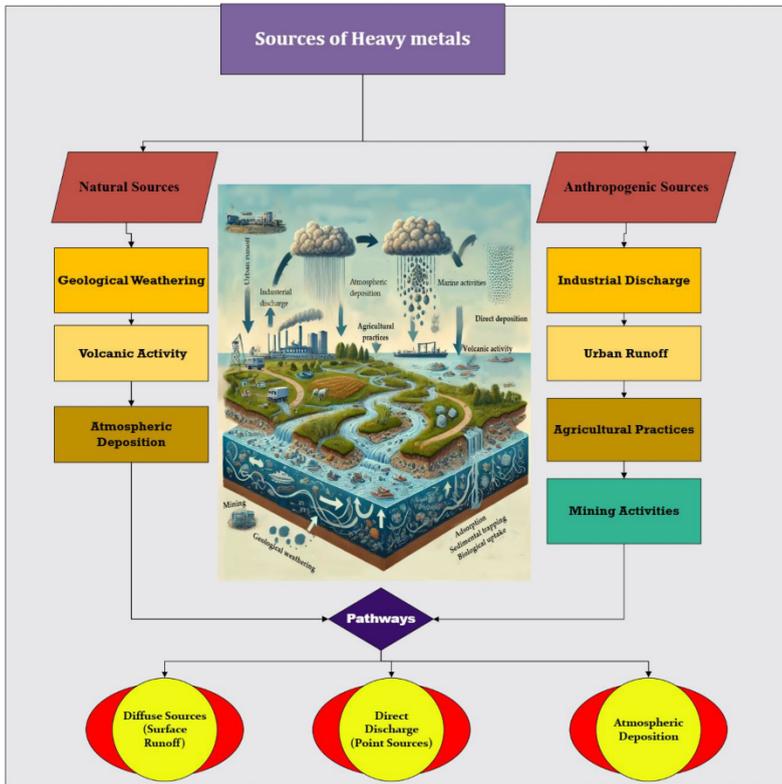
### **A. Sumber Logam Berat di Lingkungan Perairan**

Logam berat merupakan konstituen alami dari setiap kompartemen lingkungan. Logam-logam ini mengambil bagian dalam reaksi bio-geokimia dan diangkut di antara kompartemen-kompartemen melalui proses alamiah, yang kecepatannya terkadang sangat dipengaruhi oleh aktivitas

manusia. Kadmium, tembaga, timbal, dan seng semuanya bersifat kalkofilik dan sering ditemukan dalam hubungan yang erat, terutama dalam endapan bijih sulfida.

Logam dapat dimobilisasi oleh proses pelapukan alami seperti erosi atau pelarutan, atau sebagai akibat langsung atau efek samping dari aktivitas manusia. Sebagai contoh, air asam tambang mengeluarkan logam dari batuan dan tanah, oksida kadmium dan seng menguap dan dilepaskan ke udara selama peleburan (Fteischer et al., 1974), dan timbal dipancarkan dari pipa knalpot mobil dengan laju tahunan dua kali lipat dari mobilisasi di seluruh dunia melalui proses alami (Brook et al., 1968). Kadmium dan timbal adalah polutan yang sangat berbahaya karena banyak penggunaannya yang cenderung menyebarkannya secara luas di lingkungan sehingga membuat daur ulang menjadi sangat sulit. Diperkirakan 106 kg Cd dan 3x1 kg Pb dilepaskan ke udara setiap tahunnya (Brook et al., 1968). Sebagian besar masuk ke dalam sistem air melalui air yang jatuh secara langsung atau melalui aliran limpasan. Selain dampak dari atmosfer, sejumlah besar logam berat masuk ke perairan alami melalui aliran limbah rumah tangga dan industri serta limpasan air dari pertanian, terutama di area penggunaan pupuk fosfat.

Setelah berada di sistem perairan alami, logam dapat mengalami berbagai transformasi termasuk spesiasi terlarut, pengendapan, dan oksidasi/reduksi (Gbr.1). Semua proses ini dapat mengubah mobilitas logam secara drastis. Konsentrasi total spesies logam terlarut dalam air dapat menjadi jauh lebih besar daripada konsentrasi logam aquo bebas karena pembentukan kompleks terlarut dengan ligan organik dan anorganik. Kekuatan kompleks dipengaruhi oleh identitas atom yang terlibat dan faktor stereokimia.



**Gambar 4.** Sumber dan jalur transportasi logam berat di lingkungan pesisir (El-Sharkawy *et al.*, 2025)

Sedimen lahan basah pesisir berfungsi sebagai penyerap berbagai polutan, termasuk logam berat, yang berasal dari sumber alami dan antropogenik [9]. Memahami sumber dan jalur kontaminasi logam berat dalam sedimen ini sangat penting untuk mengembangkan strategi pengelolaan yang ditargetkan untuk mengurangi dampaknya terhadap ekosistem lahan basah. Pada bagian berikut, kita akan mempelajari mekanisme yang mendorong distribusi dan akumulasi logam berat dalam sedimen pesisir dan mengkaji dampak ekologisnya terhadap biota lahan basah.

## Sumber-sumber Alami

Sumber alami logam berat dalam sedimen lahan basah pesisir meliputi pelapukan geologi, aktivitas vulkanik, dan pengendapan di atmosfer. Logam berat secara alami terdapat dalam batuan dan mineral, dan pelepasannya ke dalam sedimen dapat terjadi melalui proses erosi dan pelapukan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa logam berat seperti As, Pb, Cu, Cd, Cr, Sb, Zn, dan Ni dapat dilemahkan secara alami melalui pengendapan dengan fase mineral yang mengandung besi, seperti goethite, jarosite, dan hematite, di bawah kondisi geokimia tertentu (Yeongkyoo, 2018). Namun, tingkat pengenceran ini tergantung pada faktor-faktor seperti pH, kondisi redoks, dan ketersediaan permukaan mineral yang reaktif, yang mempengaruhi proses pengendapan dan stabilitas kompleks logam-mineral yang dihasilkan. Selain itu, letusan gunung berapi melepaskan beberapa elemen berat dan menyimpannya di darat atau di lingkungan air (Ilyinskaya *et al.*, 2021). Proses geologi melepaskan logam berat dari batuan dan mineral, yang berkontribusi pada tingkat dasar logam berat dalam sedimen (Ju *et al.*, 2011) menunjukkan bahwa pengendapan mineral seperti goethite, jarosite, dan hematite telah banyak digunakan untuk menyerap kelebihan Cd, As, Cu, Zn, dan Fe yang terlarut dari larutan pelindian asam. Sumber-sumber alami ini berkontribusi pada tingkat dasar logam berat yang ditemukan di sedimen pantai

## Sumber-sumber Antropogenik

Aktivitas antropogenik memainkan peran penting dalam berkontribusi terhadap kontaminasi logam berat di sedimen lahan basah pesisir, dengan beragam sumber dan mekanisme yang mendorong pelepasan dan pengangkutan logam (Huang *et al.*, 2023). Pembuangan industri, misalnya,

memasukkan sejumlah besar logam berat seperti Pb, Hg, Cd, dan Cr ke dalam lingkungan (Hossain *et al.*, 2021). Logam-logam ini sering kali berasal dari proses manufaktur, industri petrokimia, dan praktik pembuangan limbah, yang terakumulasi dalam sedimen di dekatnya karena dibuang langsung ke sistem perairan. Lokasi industri yang terletak di dekat lahan basah pesisir bertindak sebagai sumber kontaminasi yang terus-menerus, yang berdampak pada kualitas sedimen dalam waktu yang lama. Limpasan perkotaan adalah kontributor utama lainnya, mengangkut logam berat dari jalan, bangunan, dan infrastruktur perkotaan ke lahan basah pesisir (Chen *et al.*, 2022). Logam berat seperti Zn, Cu, dan Pb, yang berasal dari emisi kendaraan, keausan ban, dan bahan bangunan, terbawa oleh air hujan ke dalam lingkungan perairan. Pencemaran sumber non-titik ini memiliki dampak kumulatif terhadap kualitas sedimen, terutama pada saat terjadi hujan lebat. Praktik-praktik pertanian juga memainkan peran penting dalam kontaminasi logam berat. Penggunaan pupuk, pestisida, dan herbisida sering kali memasukkan logam seperti arsenik, kadmium, dan tembaga ke dalam tanah, yang kemudian dimobilisasi ke perairan pesisir melalui limpasan permukaan (Marchand *et al.*, 2006). Sebagai contoh, pupuk fosfat sering kali mengandung kadmium sebagai pengotor, yang berkontribusi terhadap akumulasi kadmium dalam sedimen lahan basah dari waktu ke waktu. Kegiatan pertambangan semakin memperburuk polusi logam berat dengan melepaskan logam berat seperti As, Pb, dan Ni ke dalam saluran air di sekitarnya. Proses-proses seperti ekstraksi bijih, peleburan, dan pembuangan tailing menghasilkan limbah sarat logam dalam jumlah besar, yang dapat meresap ke dalam sistem perairan dan akhirnya mengendap di sedimen (Pan *et al.*, 2022). Kontaminasi logam berat pada sedimen di Teluk Boka

Kotorska, Montenegro, diklasifikasikan berdasarkan (Tanaskovski *et al.*, 2014) sebagai tidak terkontaminasi atau terkontaminasi dengan perhitungan faktor pengayaan (EF), indeks pemuatan logam (MLI), dan indeks geoakumulasi (Igeo) atau menggunakan pedoman kualitas sedimen dari US EPA sebagai terkontaminasi berat arsenik dan kromium serta tidak terkontaminasi kadmium dan merkuri. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sedimen permukaan di Boka Kotorska Bay diperkaya dengan silikon, kalsium, astatin, dan kromium dari sumber alami dan merkuri, timbal, dan arsenik dari sumber antropogenik. Pengangkutan dan pengendapan logam berat ini bergantung pada dinamika hidrologi, seperti aliran air dan pengangkutan sedimen, sehingga memperkuat dampaknya terhadap ekosistem lahan basah di hilir. Sumber-sumber pengangkutan logam berat ke lahan basah pesisir, seperti yang digambarkan pada Gambar 1, meliputi sumber titik (alami dan antropogenik), seperti buangan industri, dan sumber-sumber yang menyebar seperti limpasan permukaan dan pengendapan di atmosfer. Proses-proses ini secara kolektif menyoroiti kompleksitas dan skala kontribusi antropogenik terhadap kontaminasi sedimen, menggaris bawahi perlunya strategi mitigasi yang ditargetkan

Setelah dilepaskan ke lingkungan, logam berat dapat masuk ke dalam sedimen lahan basah pesisir melalui berbagai jalur. Ini termasuk pembuangan langsung dari sumber titik, seperti buangan industri dan pabrik pengolahan air limbah, dan sumber-sumber yang menyebar, seperti limpasan permukaan dan pengendapan di atmosfer. Partikel tersuspensi dan logam terlarut dapat diangkut oleh limpasan air permukaan dan diendapkan di area lahan basah, di mana mereka terakumulasi dalam sedimen dari waktu ke waktu. Selain itu, pengendapan logam berat di atmosfer, terutama

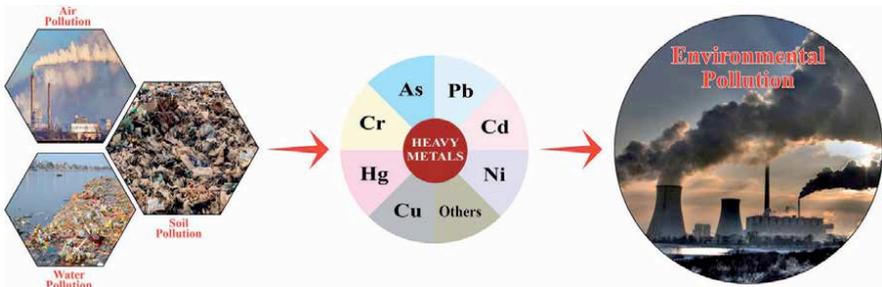
dari emisi industri dan knalpot kendaraan, berkontribusi terhadap input logam di lahan basah pesisir. Setelah diendapkan, logam berat dapat mengalami transformasi biogeokimia yang kompleks, termasuk adsorpsi pada partikel sedimen, curah hujan, dan disolusi, yang mempengaruhi mobilitas dan ketersediaan hayati mereka dalam sedimen lahan basah. Jalur transportasi logam berat ke lahan basah pesisir digambarkan pada Gambar 5.

Dalam sistem air alami, ligan anorganik yang paling penting adalah hidroksida, karbonat, sulfida, dan klorida (Leckie and James, 1974). Bilinski et al. (1976) melaporkan bahwa kompleks karbonat merupakan bentuk anorganik dominan dari Pb dan Cu dalam air tawar, namun Cd dan Zn tidak terkompleks. Dalam air laut beroksigen, kompleks-kompleks Cd, kompleks hidroksi dari Zn dan Cu dan kompleks karbonat dari Pb adalah spesies anorganik yang dominan (Stumm & Brauner, 1975). Kompleks bisulfida dan polisulfida mendominasi spesiasi keempat logam ini di perairan laut sulfida (Gardner, 1974).

## **B. Pencemaran Lingkungan dengan Logam Berat: Masalah Kesehatan Masyarakat**

Logam berat adalah ancaman lingkungan dan menjadi perhatian serius di seluruh dunia (Noman *et al.*, 2022). Industrialisasi dan urbanisasi yang cepat telah menyebabkan logam berat mencemari atmosfer dan menjadi masalah bagi kesehatan manusia (Nour *et al.*, 2019; Kahal *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020). Logam berat merupakan ancaman lingkungan yang besar bagi organisme hidup dan habitat karena sifatnya yang tidak dapat terurai secara alami, bioakumulasi, stabilitas lingkungan, persistensi, dan biotoksitas (Khan *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Ustaoglu and Islam, 2020). Untuk mencegah aktivitas mikroba, mereka dapat secara langsung

mempengaruhi sifat fisik dan kimia sedimen, tanah dan air (Omwene *et al.*, 2018). Mereka juga dapat mengganggu ekosistem alami dan berdampak pada tubuh manusia secara akut dan permanen melalui rantai makanan (Lian *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2020; Viana *et al.*, 2023). Logam berat yang tidak dapat terurai juga dapat terakumulasi di sedimen permukaan untuk waktu yang lama melalui efek amplifikasi rantai makanan, menyebabkan berbagai penyakit dan komplikasi dalam tubuh manusia (Pogorilic, Vitezica and Bolanca, 2011; Mohammad Ali *et al.*, 2021; Noman *et al.*, 2022).



**Gambar 5.** Sources, metals and the environmental degradation (Nour *et al.*, 2019)

Aktivitas alami (misalnya pelapukan geologi, curah hujan di atmosfer, erosi gelombang, angin, dan bioturbasi) dan aktivitas antropogenik (misalnya industrialisasi yang cepat, urbanisasi, limpasan pertanian, dan transportasi) memainkan peran kunci dalam penyebaran logam berat ke habitat laut ekosistem perairan seperti sungai dan muara. (Ding *et al.*, 2018; Nour *et al.*, 2019; Kahal *et al.*, 2020). Selain itu, aktivitas manusia yang dapat menghasilkan polusi industri, pengendapan limbah perkotaan, dan penggunaan pupuk kimia dan pestisida yang ofensif mengakibatkan akumulasi dan tenggelamnya logam berat di sedimen permukaan habitat akuatik. (Kinimo *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2019; Varol *et al.*, 2020).

Logam Berat yang dilepaskan ke dalam kolom air memiliki efek negatif pada kualitas air (Timofeev, Kosheleva and Kasimov, 2018; Ali *et al.*, 2020) dan pada sedimen permukaan yang mengubah parameter lingkungan seperti pH, suhu, bioturbasi, dan lain-lain (Singh and Kumar, 2017). Oleh karena itu, kualitas sedimen dapat memainkan peran penting dalam mengidentifikasi dampak aktivitas alami dan antropogenik (Bhuyan *et al.*, 2017; Nour and El-Sorogy, 2017; El-Sorogy *et al.*, 2018); Kualitas sedimen juga dapat memberikan informasi mengenai dampak antropogenik terhadap ekosistem dan memandu kebijakan dan pengelolaan lingkungan (Tian *et al.*, 2017).

Limbah pertanian, limpasan pertanian, pestisida, limbah padat, pengelolaan sampah, limbah dari pabrik pengolahan ikan, pengolahan rami, pabrik semen, penyulingan minyak, pabrik pupuk, bahan bangunan, pabrik sup dan deterjen, serta limbah batu bata merupakan sumber utama pencemaran (Gambar 2). Karena potensi risiko logam berat dalam air, tanah dan sedimen melalui pembuangan limbah yang disebutkan di atas, maka air sungai, sedimen dan lingkungan ini mungkin penting

Sumber utama paparan logam berat bagi populasi manusia adalah makanan dan air minum. Intensifikasi logam berat dalam kegiatan industri dan pertanian telah menyebabkan banyak industrialisasi, urbanisasi modern, dan perkembangan ekonomi yang pesat di seluruh dunia (Dixit *et al.*, 2015). Kegiatan-kegiatan ini dapat menyebabkan polusi logam berat beracun di air, udara, dan tanah. Media yang terkontaminasi logam berat berkontribusi pada bioakumulasi unsur-unsur ini dari lingkungan dalam rantai makanan manusia, yang pada akhirnya mencapai tubuh manusia. Ada

beberapa dampak kesehatan dari HM pada tubuh manusia tergantung pada jumlah dan lamanya paparan (Gambar 3).

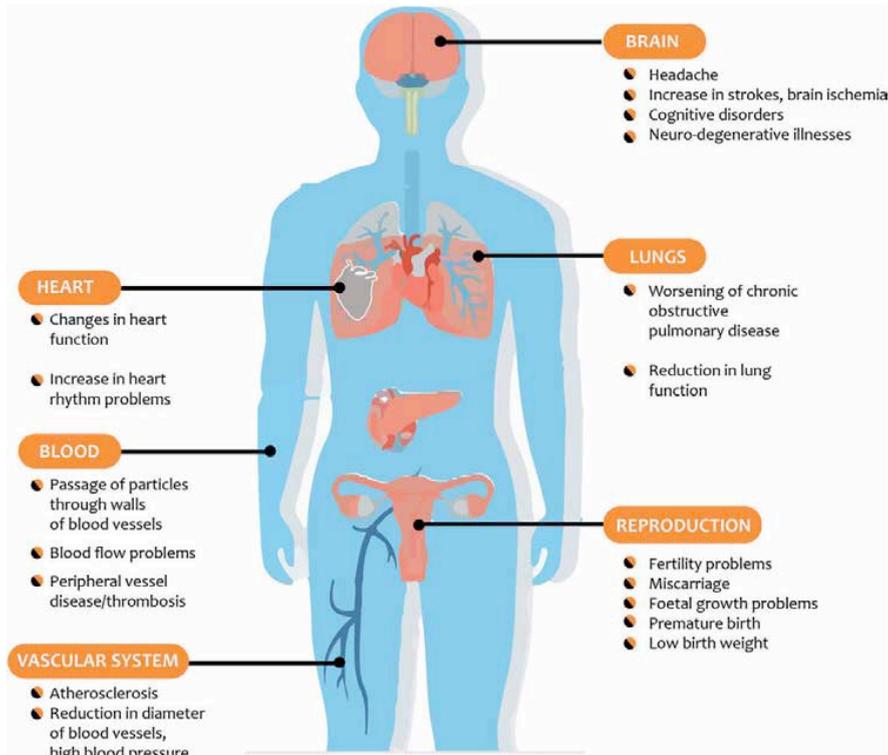
Di antara berbagai logam berat yang berbeda, Cd dianggap sebagai logam paling berbahaya dan beracun ketujuh yang menyebabkan stres oksidatif tidak langsung dan memiliki efek karsinogenik dan mutagenik yang mengakibatkan masalah kesehatan yang parah pada tubuh manusia seperti kerusakan ginjal, disfungsi prostat, penyakit tulang, dan kanker (Adamis *et al.*, 2003). Hal ini juga dapat menyebabkan disfungsi ginjal dan proteinuria jika Cd terpapar dalam jangka waktu yang lama pada ginjal..

Arsenik juga menyebabkan kerusakan kulit, kanker dan masalah yang ditandai dengan sistem peredaran darah. Ketika melewati batas yang diizinkan dalam air minum juga menyebabkan kelainan perkembangan, penyakit neurobehavioral, penyakit kardiovaskular dan penyakit pendengaran, bersama dengan anemia, leukopenia, eosinofilia, dan karsinoma. (Tchounwou, 2008).

Kromium dikenal sebagai logam berat yang sangat beracun karena dapat melintasi membran sel melalui sistem transportasi sulfat dan menyebabkan denaturasi dan mutasi asam nukleat dan protein. Hal ini juga menimbulkan masalah kesehatan yang kritis seperti masalah kulit, iritasi hidung, gangguan pendengaran dan karsinoma paru-paru.(Chen *et al.*, 2010; Lian *et al.*, 2019; Hossain *et al.*, 2021).

Timbal juga dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti penurunan kecerdasan, kehilangan ingatan, kemandulan, perubahan suasana hati, kelemahan persendian, mual, insomnia, anoreksia, atau bahkan kematian(Chen *et al.*, 2010). Anak-anak dan bayi lebih sensitif terhadap keracunan

Pb daripada orang dewasa. Rincian tentang efek dari berbagai logam berat yang berbeda terhadap kesehatan manusia.



**Gambar 6.** Efek logam berat pada berbagai organ vital kesehatan manusia (Reitner and Thiel, 2011)

### C. Polusi Logam dan Mineral Berbahaya: Sumber, Toksisitas, dan Manajemen

Berdasarkan densitas, logam yang memiliki nilai densitas lebih besar dari 5 g/cm<sup>3</sup> dianggap sebagai logam berat (Järup, 2003). Menurut penelitian ini, logam berat yang dianggap paling mengancam manusia adalah timbal, kadmium, merkuri, dan arsenik.. Duffs (Duffus, 2002) meninjau penggunaan istilah logam berat dari sejarah dan akhirnya, ia menyimpulkan bahwa penggunaan istilah "logam berat" tidak ada artinya. Dia menetapkan bahwa tidak ada

hubungan antara kepadatan logam dan penggunaan istilah tersebut. Dalam kasus logam berat, arsenik metaloid juga termasuk, dari sini istilah berat berarti mungkin toksisitas.

Beberapa logam berat memiliki kepentingan biologis yang sangat penting dalam jumlah kecil terutama elemen-elemen yang ada pada periode ke-4 dalam tabel periodik modern. Kepentingan biologis dari logam-logam ini adalah fungsi enzim (vanadium dan mangan), fungsi hormon, produksi (selenium), pertumbuhan sel (nikel), dan pertumbuhan metabolisme (arsenik). Tetapi logam-logam ini dibutuhkan oleh manusia dalam jumlah yang sangat kecil, dan jika jumlahnya meningkat dalam tubuh, maka logam-logam ini akan menyebabkan efek yang merugikan bagi kesehatan manusia. Secara keseluruhan logam berat harus dianggap memiliki kepadatan yang tinggi dan juga penting secara biologis dalam jumlah kecil.

Penentuan logam berat di berbagai segmen lingkungan, seperti udara, air, dan tanah, sangat penting dilakukan karena sifatnya yang karsinogenik dan toksik. IARC (Badan Internasional untuk Penelitian Kanker) menyatakan arsenik, kromium heksavalen, kadmium, dan nikel serta senyawanya sebagai karsinogen kelompok 1 (karsinogen yang terbukti). Arsenik dan senyawanya menyebabkan kanker kandung kemih, hati, dan paru-paru. Kromium heksavalen menyebabkan kanker paru-paru dan nikel serta senyawanya menyebabkan kanker rongga hidung dan paru-paru. Semua elemen ini menyebabkan kanker pada manusia dengan rute paparan melalui inhalasi dan konsumsi. Mengenai ketersediaan berbagai logam berat di kerak bumi adalah sekitar 5%, di antaranya besi menempati hampir 95% (Lide, 2004).

Karena toksisitas dan sifat karsinogeniknya, sebagian besar peneliti di seluruh dunia melaporkan tentang penentuan dan implikasi kesehatan dari logam berat di lingkungan. Beberapa di antaranya dibahas di bawah ini.

Buckner dan kawan-kawan, 2016 melaporkan sumber, paparan, dan toksisitas merkuri. Kotian, 2025 meninjau konsentrasi logam berat di udara ambien. Penelitian ini terbatas pada estimasi toksisitas logam berat di atmosfer India dan penelitian lain (Suvarapu and Baek, 2017) mereka meninjau penentuan logam berat di udara ambien di seluruh dunia. Kim, Kim and Kumar, 2019, mengulas toksisitas logam berat dan strategi terapeutik pengkhelat. Giller, Witter and Mcgrath, 1998 mengulas toksisitas logam berat pada mikroorganisme di tanah pertanian. Penelitian ini menemukan bahwa mikroorganisme dalam tanah jauh lebih sensitif terhadap toksisitas logam berat dibandingkan hewan dan tumbuhan. Yabe, Ishizuka and Umemura, 2010, merangkum polusi logam berat dan dampaknya terhadap lingkungan

dan populasi manusia di Afrika. Das, Samantaray and Rout, 1997, mengulas toksisitas kadmium pada tanaman. Proshad *et al.*, 2018, mengulas toksisitas logam berat di tanah Bangladesh. Dalam penelitian ini, mereka berkonsentrasi pada dampak industrialisasi terhadap konsentrasi logam berat dalam tanah. Su, Jiang and Zhang, 2014 melaporkan kontaminasi logam berat di tanah di seluruh dunia. Dalam studi ini, mereka menyebutkan situasi kontaminasi dan metode remediasi saat ini.

## **D. Tantangan dan Inovasi dalam Rekayasa Lingkungan**

### **1. 6.4.1. Best Management Practices (BMPs)**

BMP, yang juga dikenal sebagai praktik pembangunan berdampak rendah (LID), menangani masalah hidrologi dan kualitas air di lingkungan pertanian dan perkotaan (Liu *et al.*, 2017). Menerapkan BMP untuk penggunaan lahan perkotaan dan pertanian dapat membantu mengurangi limpasan dan erosi, sehingga mengurangi pengangkutan polutan yang terikat pada sedimen, termasuk logam berat, ke lahan basah. BMP pertanian mencakup berbagai strategi seperti pertanian kontur, rotasi tanaman, manajemen nutrisi, tanaman penutup, tanpa pengolahan tanah, saluran air berumput, lahan basah yang dibangun, struktur stabilisasi tanah, strip penyangga bervegetasi, dan saluran air (genteng) tertutup (Ahiablame, Engel and Chaubey, 2012).

Di daerah perkotaan, praktik yang umum dilakukan meliputi sistem bioretensi, trotoar berpori, teras permeabel, tong/tangki air hujan, atap hijau, kolam basah, dan kolam kering, yang bertujuan untuk mengolah kuantitas dan kualitas limpasan air hujan (Liu *et al.*, 2015). Lahan basah dan kolam yang dibangun adalah praktik berskala besar yang biasanya diterapkan di saluran drainase untuk mengelola limpasan air hujan, sementara praktik berskala lebih kecil seperti strip penyangga, sistem bioretensi, dan atap hijau didistribusikan di seluruh lokasi pada sumber polusi (Liu, Bralts and Engel, 2015; Zhuang *et al.*, 2016). BMP ini mencakup berbagai tindakan, termasuk penyangga vegetatif, struktur pengendalian erosi, praktik pengelolaan air hujan, dan teknik konservasi tanah (Silva *et al.*, 2024). Dengan meminimalkan masuknya polutan yang terikat pada

sedimen ke dalam ekosistem lahan basah, BMP memainkan peran penting dalam menjaga kualitas sedimen dan mengurangi risiko kontaminasi logam pada biota lahan basah (Noe et al., 2020; Silva et al., 2024).

## 2. *Remediation Techniques*

Teknik remediasi bertujuan untuk mengurangi kontaminasi yang ada dan memulihkan kualitas sedimen di area lahan basah yang terkena dampak (Peng *et al.*, 2018). Teknik remediasi yang umum dilakukan untuk sedimen yang terkontaminasi logam berat adalah sebagai berikut:

Pengerukan Sedimen: Solusi teknik, seperti pengerukan, stabilisasi sedimen, dan teknologi pengolahan *in situ*, umumnya digunakan untuk memulihkan kontaminasi logam berat di daerah pesisir (Lofrano *et al.*, 2017). Pengerukan melibatkan pemindahan sedimen yang terkontaminasi secara mekanis dari badan air, diikuti dengan pembuangan atau pengolahan (Palermo *et al.*, 2014). Teknik stabilisasi sedimen, seperti pemadatan dan stabilisasi, bertujuan untuk melumpuhkan kontaminan secara *in situ* dengan menambahkan bahan tambahan seperti semen atau kapur pada sedimen (De Gisi *et al.*, 2021). Teknologi pengolahan *in situ*, seperti oksidasi / reduksi kimiawi dan remediasi mikroba, menggunakan agen kimia atau biologis untuk mengubah atau menurunkan kontaminan dalam sedimen (De Voogt, 2015). Solusi rekayasa menawarkan fleksibilitas dan skalabilitas untuk mengatasi kontaminasi logam berat di lingkungan pesisir, tetapi efektivitasnya tergantung pada kondisi spesifik lokasi dan sifat kontaminan

Penutupan: Penutupan sedimen melibatkan penempatan lapisan sedimen bersih atau bahan rekayasa di atas sedimen yang terkontaminasi untuk mengisolasi dan menahan kontaminan (Peng *et al.*, 2018). Penutupan dapat secara efektif mengurangi paparan organisme bentik terhadap logam berat dan mencegah resuspensi dan distribusi ulang sedimen yang terkontaminasi. Penutup yang direkayasa dapat mencakup bahan-bahan seperti karbon aktif (Murphy *et al.*, 2006), mineral tanah liat, dan Zeolit (Baker, Massadeh and Yonnes, 2008), yang meningkatkan imobilisasi kontaminan dan meminimalkan pencucian logam berat ke dalam kolom air. Penutupan sedimen telah berhasil diterapkan di daerah pesisir untuk meremediasi sedimen yang terkontaminasi dan memulihkan kualitas habitat (Jaglal, 2020). Namun, tantangan seperti stabilitas jangka panjang, integritas penutup, dan potensi dampak ekologis harus dipertimbangkan dengan cermat ketika menerapkan proyek pembatasan sedimen di lingkungan pesisir

### 3. *Phytoremediation*

Fitoremediasi telah muncul sebagai strategi yang menjanjikan untuk meremediasi kontaminasi logam berat di daerah pesisir, dengan memanfaatkan tanaman untuk mengekstrak, menstabilkan, atau mendegradasi logam berat di tanah dan sedimen yang terkontaminasi (Weerasinghe and Ariyawansa, 2008). Melalui mekanisme seperti fitoekstraksi, filtrasi rizoid, dan fitostabilisasi, tanaman memiliki kemampuan untuk mengakumulasi logam berat dalam jaringan mereka tanpa mengganggu lapisan tanah atas, menjadikannya metode yang ramah lingkungan

(Cristaldi *et al.*, 2017; Jaglal, 2020). Di lingkungan pesisir, tanaman lahan basah seperti rumput rawa asin dan bakau telah diselidiki potensinya untuk meremediasi sedimen yang terkontaminasi logam berat (Wu, Geng and Huang, 2015). Tanaman ini menyerap logam berat seperti Cu, Zn, As, Pb, Fe, Cd, Hg, dan Co dari air pori sedimen, mengakumulasinya di akar, tunas, dan daunnya, sehingga mengurangi konsentrasi logam dalam sedimen dan kolom air (Wuet *et al.*, 2015). Fitoremediasi menawarkan beberapa keuntungan, termasuk biaya rendah, dampak lingkungan yang minimal, dan manfaat tambahan yang potensial seperti restorasi habitat dan penyerapan karbon (Song *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2023). Menanam tanaman di tanah yang terkontaminasi menghasilkan manfaat ekologi dan ekonomi melalui fitostabilisasi; fitoekstraksi logam mulia seperti Hg, Ag, dan Ni; pengelolaan lahan yang berkelanjutan; serta peningkatan utilitas dan kesuburan tanah (Sarwar *et al.*, 2017). Strategi berbasis tanaman dalam fitoremediasi meliputi fitostabilisasi, fitodegradasi, fitovolatilisasi, fitofiltrasi, dan fitoekstraksi (Wang *et al.*, 2017).

#### **4. Monitoring dan Adaptive Management**

Pemantauan kualitas sedimen, tingkat kontaminan, dan indikator ekologi secara teratur sangat penting untuk menilai efektivitas strategi pengelolaan dan mengidentifikasi ancaman yang muncul. Program pemantauan harus mencakup penilaian spasial dan temporal dari konsentrasi logam berat dalam sedimen, air pori, dan biota, serta survei ekologi untuk mengevaluasi perubahan kualitas habitat lahan basah

dan keanekaragaman hayati (Kumar and Khan, 2020). Pendekatan manajemen adaptif, yang mengintegrasikan data pemantauan dengan proses pengambilan keputusan manajemen, memungkinkan penyempurnaan dan penyesuaian strategi manajemen yang berkelanjutan berdasarkan informasi baru dan perubahan kondisi lingkungan [158]. Kontaminasi logam berat sangat penting untuk menilai kesehatan ekosistem pesisir dan mengembangkan program pemantauan yang sesuai dengan Rencana Aksi. Hal juga membantu dalam mengidentifikasi sumber polusi, rute, dan titik-titik polusi, yang memungkinkan para pembuat kebijakan untuk melaksanakan langkah-langkah pencegahan dan pengendalian polusi yang ditargetkan sesuai dengan prosedur Konvensi. Selain itu, studi semacam itu berkontribusi pada pengetahuan yang lebih baik tentang risiko dan kerentanan lingkungan di wilayah pesisir, sekaligus menginformasikan proses pengambilan keputusan untuk perencanaan tata guna lahan, operasi industri, dan pengelolaan limbah dalam kerangka kerja pengelolaan zona pesisir terpadu.

## **5. Stakeholder Engagement and Education**

Melibatkan para pemangku kepentingan, termasuk lembaga pemerintah, perwakilan industri, masyarakat setempat, dan organisasi konservasi, sangat penting untuk mendorong kolaborasi dan tanggung jawab bersama dalam mengelola kontaminasi logam berat di lahan basah pesisir. Inisiatif pendidikan dan penjangkauan publik dapat meningkatkan kesadaran tentang pentingnya konservasi lahan basah, risiko pencemaran logam berat, dan manfaat mengadopsi

praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan. Membangun kemitraan dan membina keterlibatan masyarakat dapat membantu memobilisasi dukungan untuk upaya konservasi dan memastikan perlindungan jangka panjang ekosistem lahan basah.

Strategi pengelolaan ini, memberikan kerangka kerja untuk mengatasi kontaminasi logam berat di sedimen lahan basah pesisir dan menjaga kesehatan dan integritas ekosistem yang berharga ini. Dengan mengintegrasikan upaya pencegahan pencemaran, remediasi, pemantauan, dan pelibatan pemangku kepentingan, dimungkinkan untuk mengurangi dampak buruk kontaminasi logam dan mempromosikan pengelolaan lahan basah pesisir yang berkelanjutan.

#### **E. *Challenges and Limitations of Remediation Efforts:***

Remediasi kontaminasi logam berat di wilayah pesisir menghadirkan banyak tantangan dan keterbatasan yang dapat menghambat efektivitas upaya remediasi. Tantangan-tantangan ini muncul dari interaksi yang kompleks antara kontaminan, matriks lingkungan, dan proses ekologi serta kendala teknis, logistik, dan keuangan. Beberapa tantangan dan keterbatasan utama meliputi hal-hal berikut:

1. Persistensi dan stabilitas jangka panjang: Logam berat dikenal karena persistensi dan stabilitas jangka panjangnya di lingkungan, sehingga menimbulkan tantangan bagi upaya remediasi. Pengikatannya pada partikel sedimen dan penggabungannya ke dalam fase mineral yang stabil mengurangi ketersediaan hayati mereka, tetapi juga meningkatkan ketahanannya terhadap pelemahan alami. Bahkan setelah kegiatan

remediasi, sisa kontaminasi dapat tetap berada di sedimen dan badan air, yang mengarah pada potensi risiko kontaminasi ulang dan dampak ekologis dari waktu ke waktu. Kegigihan ini memerlukan pemantauan dan pemeliharaan jangka panjang untuk memastikan keberlanjutan upaya remediasi.

2. Teknologi remediasi yang terbatas: Fitoremediasi, penutupan sedimen, dan pengolahan in situ menawarkan manfaat potensial, tetapi kelayakan dan efisiensinya tergantung pada kondisi spesifik lokasi, karakteristik kontaminan, dan tujuan proyek. Namun, teknologi remediasi yang tersedia untuk mengatasi kontaminasi logam berat di daerah pesisir seringkali terbatas dalam efektivitas dan penerapannya. Fitoremediasi, misalnya, membutuhkan waktu dan ruang yang luas untuk mencapai hasil yang terukur, dan efektivitasnya berkurang pada tanah asin atau tanah yang tergenang air yang merupakan ciri khas lingkungan pesisir. Demikian pula, perawatan in situ yang menggunakan bahan kimia mungkin menghadapi tantangan terkait distribusi yang tidak merata dan interaksi yang tidak dapat diprediksi dengan matriks sedimen alami. Keterbatasan skalabilitas dan kemampuan beradaptasi dari teknologi ini menyoroti perlunya memajukan pendekatan terpadu dan hibrida yang disesuaikan dengan kondisi lokal.
3. Kompleksitas dan heterogenitas lokasi: Lingkungan pesisir memiliki tingkat kompleksitas dan heterogenitas yang tinggi, yang dapat mempersulit upaya remediasi. Lingkungan ini menunjukkan variabilitas spasial dan temporal yang tinggi karena proses dinamis seperti aksi pasang surut, transportasi

sedimen, dan pengendapan bahan organik. Faktor-faktor seperti proses hidrodinamika, dinamika sedimen, dan interaksi biologis dapat memengaruhi distribusi dan nasib kontaminan, sehingga sulit untuk mencapai hasil remediasi yang seragam di berbagai lokasi. Faktor-faktor ini menciptakan distribusi kontaminan yang heterogen, sehingga mempersulit upaya remediasi. Sebagai contoh, kekuatan hidrodinamika dapat mendistribusikan kembali kontaminan setelah kegiatan pengerukan atau penutupan, sementara heterogenitas sedimen dapat menyebabkan hasil perawatan yang tidak merata. Mengatasi kompleksitas ini membutuhkan pemahaman terperinci tentang proses spesifik lokasi dan alat pemodelan canggih untuk memprediksi perilaku kontaminan secara akurat.

4. Dampak ekologis dan timbal balik: Kegiatan remediasi mungkin memiliki dampak ekologis yang tidak diinginkan dan timbal balik yang harus dipertimbangkan dengan hati-hati. Sebagai contoh, proyek pengerukan dan penutupan sedimen dapat mengganggu habitat bentik dan mengganggu fungsi ekosistem, sementara perawatan kimia dapat menimbulkan risiko tambahan terhadap organisme non-target dan kualitas sedimen. Pengorbanan ini menyoroti pentingnya mengadopsi pendekatan yang sensitif secara ekologis dan melakukan penilaian risiko yang komprehensif sebelum menerapkan strategi remediasi.
5. Biaya dan sumber daya: Remediasi kontaminasi logam berat di daerah pesisir dapat memakan biaya dan sumber daya yang besar, membutuhkan investasi waktu, tenaga kerja, dan sumber daya keuangan yang

signifikan. Biaya tinggi yang terkait dengan kegiatan remediasi dapat membatasi kelayakan proyek skala besar dan menghambat upaya untuk mengatasi kontaminasi di masyarakat yang kurang beruntung secara ekonomi. Teknik seperti pengerukan sedimen dan perawatan *ex situ* sering kali membutuhkan investasi besar dalam peralatan khusus, tenaga kerja, dan pemeliharaan jangka panjang. Biaya yang tinggi dapat menjadi penghalang bagi daerah yang kurang beruntung secara ekonomi, di mana sumber daya keuangan yang terbatas membatasi ruang lingkup dan ambisi proyek remediasi. Mengeksplorasi alternatif yang hemat biaya, seperti penggunaan amandemen yang bersumber secara lokal atau inisiatif fitoremediasi yang digerakkan oleh masyarakat, dapat membantu mengatasi kesenjangan ini.

6. Peraturan dan kepedulian pemangku kepentingan: Persyaratan peraturan dan kekhawatiran pemangku kepentingan dapat menjadi hambatan dalam mengimplementasikan proyek remediasi di wilayah pesisir. Proses perizinan, kepatuhan terhadap peraturan lingkungan, dan kegiatan pelibatan pemangku kepentingan dapat menambah kerumitan dan penundaan dalam upaya remediasi, yang memengaruhi jadwal dan hasil proyek. Selain itu, oposisi dari masyarakat lokal atau kelompok kepentingan dapat muncul karena risiko yang dirasakan atau komunikasi yang tidak memadai, yang semakin memperumit upaya. Keterlibatan yang transparan dengan para pemangku kepentingan dan strategi resolusi konflik yang proaktif sangat penting untuk mengatasi hambatan-hambatan ini dan memastikan keberhasilan inisiatif remediasi.



# Pemanasan Global dan Perubahan Iklim

## A. Pendahuluan

Pemanasan global merupakan fenomena yang menggambarkan peningkatan suhu rata-rata di permukaan bumi, termasuk daratan, lautan, dan atmosfer. Selama seratus tahun terakhir, suhu permukaan bumi telah meningkat sekitar 0,6 derajat Celsius (Siagian, 2023). Peningkatan suhu ini disebabkan oleh berbagai faktor, terutama emisi gas rumah kaca yang diperoleh dari aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi. Gas-gas seperti karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), dan dinitrogen oksida ( $\text{N}_2\text{O}$ ), memerangkap panas yang seharusnya dipantulkan kembali ke luar angkasa, sehingga mengakibatkan efek rumah kaca. Sedangkan Perubahan iklim merupakan modifikasi jangka panjang dalam suhu dan pola meteorologi di bumi. Fenomena ini dapat berlangsung dalam jangka waktu yang sangat panjang dan mencakup perubahan pola cuaca serta distribusi peristiwa meteorologi. Faktor utama yang menyebabkan perubahan iklim adalah pemanasan global.

Bukti ilmiah mengenai pemanasan sistem iklim tidak dapat disangkal. Inti es yang diperoleh dari Greenland,

Antartika, dan gletser pegunungan tropis menunjukkan bahwa iklim bumi bereaksi terhadap perubahan kadar gas rumah kaca. Bukti kuno juga dapat ditemukan dalam lingkaran pohon, sedimen laut, terumbu karang, dan lapisan batuan sedimen. Bukti kuno, atau paleoklimat, ini mengungkapkan bahwa pemanasan saat ini berlangsung sekitar 10 kali lebih cepat dibandingkan dengan laju pemanasan rata-rata pasca-zaman es. Emisi karbon dioksida akibat aktivitas manusia meningkat sekitar 250 kali lebih cepat dibandingkan dengan sumber alami setelah periode zaman es (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2025).

## **B. Penyebab Pemanasan Global dan Perubahan Iklim**

Pemanasan global dan perubahan iklim merupakan fenomena yang kompleks yang disebabkan oleh berbagai faktor, baik alami maupun antropogenik. Berikut adalah beberapa faktor utama yang menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim:

1. *Emisi Gas Rumah Kaca*: Salah satu faktor utama pemanasan global adalah peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, khususnya karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan metana ( $\text{CH}_4$ ). Gas-gas ini dihasilkan melalui pembakaran bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak, gas alam, serta dari aktivitas pertanian dan industri. Gas rumah kaca ini berfungsi sebagai selimut yang menjebak panas di atmosfer yang mengakibatkan peningkatan suhu bumi yang menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim (Society, 2025).
2. *Deforestasi*: Penebangan hutan untuk pertanian, pemukiman, dan kegiatan industri mengurangi jumlah pohon yang mampu menyerap  $\text{CO}_2$ . Deforestasi tidak

hanya mengurangi kapasitas bumi untuk menyerap karbon, tetapi juga melepaskan karbon yang terakumulasi dalam pohon ke atmosfer (Lawrence et al., 2022).

3. *Penggunaan Bahan Bakar Fosil*: Penggunaan bahan bakar fosil untuk transportasi, pemanasan, dan pembangkit listrik adalah salah satu sumber utama emisi gas rumah kaca. Sejak revolusi industri, ketergantungan pada bahan bakar fosil telah meningkat secara signifikan, berkontribusi pada pemanasan global dan perubahan iklim (Tjiwidjaja and Salima, 2023).
4. *Polusi dari Transportasi*: Emisi dari kendaraan bermotor, termasuk karbon dioksida dan nitrogen oksida, merupakan salah satu sumber utama polusi udara yang berkontribusi pada pemanasan global. Asap yang dihasilkan dari kendaraan ini mengandung gas rumah kaca yang berbahaya bagi lingkungan (Fountain et al., 2024).
5. *Aktivitas Industri*: Proses industri yang menghasilkan emisi gas rumah kaca, seperti pembuatan semen, baja, dan produk kimia, juga berkontribusi pada pemanasan global. Emisi dari sektor industri sering kali tidak terpantau dan dapat memiliki dampak yang signifikan (Ramadhani and Venusita, 2020).
6. *Perubahan Penggunaan Lahan*: Perubahan dalam penggunaan lahan, seperti alih fungsi hutan menjadi lahan pertanian atau kawasan perkotaan, juga mempengaruhi perubahan iklim. Aktivitas ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dalam stok karbon dan meningkatkan emisi gas rumah kaca (Kurniawan, Hartanto and Susi, 2023).

7. *Pertanian dan Peternakan*: Aktivitas pertanian, terutama peternakan, menghasilkan emisi metana yang signifikan. Metana merupakan gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan CO<sub>2</sub> dalam jangka pendek (Komarudin et al., 2022).
8. *Variasi Aktivitas Matahari*: Ada dugaan bahwa variasi dalam aktivitas matahari juga berkontribusi pada pemanasan saat ini. Peningkatan aktivitas matahari dapat mempengaruhi suhu bumi, namun kontribusinya jauh lebih kecil dibandingkan dengan efek gas rumah kaca yang dihasilkan manusia (Syamsudin, 2018).

Memahami penyebab-penyebab ini, memungkinkan kita dapat lebih baik merumuskan strategi untuk mengurangi emisi dan memitigasi dampak pemanasan global dan perubahan iklim.

### C. Dampak Pemanasan Global Terhadap Lingkungan

Pemanasan global memiliki dampak besar terhadap lingkungan, yang dapat mempengaruhi ekosistem, sumber daya alam, dan kehidupan manusia. Berikut adalah beberapa dampak utama:

1. *Mencairnya Es di Kutub*: Salah satu dampak paling mencolok dari pemanasan global adalah mencairnya es di Kutub Utara dan Selatan. Fenomena ini tidak hanya menyebabkan kenaikan permukaan laut, tetapi juga mengganggu habitat hewan yang bergantung pada es, seperti beruang kutub dan penguin (Kurniawan, Fatmawati and Miswanto, 2021).
2. *Kenaikan Permukaan Laut*: Mencairnya es menyebabkan permukaan laut meningkat, yang dapat mengancam daerah pesisir. Hal ini berpotensi meningkatkan frekuensi

dan intensitas banjir, serta mengakibatkan hilangnya lahan dan habitat alami (Hakim and Anjasmara, 2016).

3. *Perubahan Pola Cuaca*: Pemanasan global mengakibatkan perubahan pola cuaca, termasuk peningkatan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem seperti badai, hujan lebat, dan kekeringan. Dampaknya dapat merusak infrastruktur dan mengganggu kehidupan sehari-hari masyarakat (Samidjo and Suharso, 2017).
4. *Kekeringan dan Krisis Air*: Pemanasan global memperburuk masalah kekurangan air di daerah-daerah yang sudah mengalami kesulitan air. Kekeringan yang lebih sering dapat mempengaruhi pertanian, mengurangi hasil panen, dan meningkatkan risiko kelaparan (Irianto et al., 2024).
5. *Peningkatan Risiko Kebakaran Hutan*: Suhu yang lebih tinggi dan kondisi yang lebih kering meningkatkan risiko kebakaran hutan. Kebakaran ini tidak hanya merusak habitat, tetapi juga melepaskan lebih banyak karbon ke atmosfer, memperburuk pemanasan global (Firmansyah et al., 2024).

#### **D. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Lingkungan**

Perubahan iklim memiliki dampak yang signifikan dan luas terhadap lingkungan. Berikut adalah beberapa dampak utama yang dapat diamati:

1. *Peningkatan Suhu Global*: Dampak yang paling langsung dari perubahan iklim adalah naiknya suhu rata-rata global. Hal ini menyebabkan perubahan dalam pola cuaca dan dapat menimbulkan cuaca ekstrem, seperti gelombang panas yang lebih sering dan lebih intens (World Meteorological Organization, 2024).

2. *Perubahan Pola Curah Hujan*: Perubahan iklim menyebabkan pergeseran dalam pola curah hujan, yang dapat mengakibatkan kekeringan di beberapa wilayah dan banjir di wilayah lainnya. Ketidakpastian dalam curah hujan ini dapat mempengaruhi pertanian dan ketersediaan air (T.H., B.M. and M., 2016).
3. *Gangguan Ekosistem*: Perubahan iklim dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, menyebabkan spesies tertentu terancam punah dan mengubah distribusi flora dan fauna. Habitat alami dapat hilang, dan keanekaragaman hayati terancam dan mengganggu rantai makanan (Ahmady and Rahman, 2025).
4. *Perubahan Migrasi Spesies*: Banyak spesies hewan dan tumbuhan yang terpaksa menyesuaikan diri dengan perubahan iklim dengan berpindah ke habitat baru. Hal ini dapat mengganggu ekosistem yang ada dan menyebabkan konflik antara spesies yang berbeda (Daoust and Selby, 2024).
5. *Dampak pada Sumber Daya Alam*: Perubahan iklim dapat berpengaruh pada ketersediaan sumber daya alam, seperti air dan pangan. Ketidakpastian dalam iklim dapat mengganggu produksi pertanian dan mengancam ketahanan pangan (Kushawaha et al., 2021).
6. *Kesehatan Lingkungan*: Perubahan iklim dapat mempengaruhi kualitas udara dan air, yang dapat meningkatkan risiko polusi dan penyakit. Peristiwa cuaca ekstrem, seperti badai dan banjir, dapat merusak infrastruktur dan menyebabkan kerusakan lingkungan yang lebih luas (Zulfa and Septiana, 2024).
7. *Dampak pada Kesehatan Manusia*: Perubahan iklim dapat mempengaruhi kesehatan manusia dengan

meningkatkan alergi, penyakit pernapasan, dan penyebaran penyakit yang ditularkan oleh vektor, seperti malaria dan demam berdarah (Adriyani and Sujoso, 2019).

## **E. Mitigasi Terhadap Pemanasan Global dan Perubahan Iklim**

Mitigasi pemanasan global dan perubahan iklim adalah langkah-langkah yang diambil untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi dampak negatif dari perubahan iklim. Berikut adalah beberapa strategi mitigasi yang dapat diterapkan:

1. *Transisi ke Energi Terbarukan*: Mengalihkan penggunaan sumber energi fosil ke energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro dapat secara signifikan menurunkan emisi karbon. Energi terbarukan tidak hanya lebih bersih, tetapi juga berkelanjutan dalam jangka panjang (Sukmawati and Hariyani, 2025).
2. *Efisiensi Energi*: Meningkatkan efisiensi energi dalam industri, transportasi, dan bangunan dapat menurunkan konsumsi energi dan emisi. Pengurangan jejak karbon dapat dilakukan melalui penggunaan teknologi yang lebih efisien, seperti lampu LED dan peralatan hemat energi (Abdullah, 2020).
3. *Reforestasi dan Penghijauan*: Menanam pohon dan pemulihan hutan yang sudah terdegradasi dapat meningkatkan penyerapan karbon dioksida dari atmosfer. Konservasi lahan dan penghijauan lahan kritis juga berkontribusi pada mitigasi pemanasan global dan perubahan iklim (Basuki et al., 2022).
4. *Pertanian Berkelanjutan*: Mengimplementasikan praktik pertanian yang berkelanjutan, seperti rotasi tanaman,

pemanfaatan pupuk organik, dan pengelolaan air yang efisien, dapat mengurangi emisi dari sektor pertanian. Selain itu, mengurangi limbah makanan juga berkontribusi pada pengurangan emisi (Gökkür, Çağır and Arda, 2022).

5. *Transportasi Berkelanjutan*: Mendorong penggunaan transportasi umum, sepeda, dan kendaraan listrik dapat menurunkan emisi sektor transportasi. Pengembangan infrastruktur yang mendorong transportasi berkelanjutan sangat penting untuk mengurangi ketergantungan pada kendaraan berbahan bakar fosil (Din et al., 2023).
6. *Pengurangan Limbah*: Meningkatkan daur ulang dan mengurangi limbah dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dari tempat pembuangan akhir. Program pengelolaan limbah yang efektif juga dapat membantu mengurangi dampak negatif lingkungan (Kumar et al., 2023).
7. *Edukasi dan Kesadaran Masyarakat*: Meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai pentingnya tindakan individu dalam mengurangi jejak karbon mereka dapat mendorong orang untuk berperilaku lebih ramah lingkungan. Edukasi tentang pemanasan global dan dampaknya sangat penting untuk mendorong tindakan kolektif (Tang, 2022).

Penerapan strategi mitigasi ini, dapat berkontribusi pada upaya global untuk mengurangi pemanasan global dan melindungi lingkungan dari perubahan iklim untuk generasi mendatang.

## F. Adaptasi Terhadap Pemanasan Global dan Perubahan Iklim

Adaptasi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim adalah langkah-langkah yang diambil untuk menyesuaikan diri dengan dampak pemanasan global dan perubahan iklim yang telah terjadi atau yang diprediksi akan terjadi di masa depan. Berikut adalah beberapa strategi adaptasi yang dapat diterapkan:

1. *Pengelolaan Sumber Daya Air*: Mengelola sumber daya air dengan baik sangat penting karena pemanasan global dapat mengubah pola curah hujan dan meningkatkan risiko kekeringan. Hal ini termasuk membangun infrastruktur untuk penyimpanan air, penggunaan teknologi irigasi yang hemat air, dan konservasi air di sektor pertanian dan domestik (Chiew, 2024).
2. *Pertanian Berkelanjutan*: Mengadopsi metode pertanian yang meningkatkan kesuburan tanah dan varietas tanaman yang tahan terhadap kekeringan dan banjir adalah contoh praktik pertanian yang lebih tahan terhadap perubahan iklim. Hal ini dapat membantu petani beradaptasi dengan kondisi cuaca yang berubah (Verma et al., 2025).
3. *Perlindungan dan Restorasi Ekosistem*: Melindungi dan memulihkan ekosistem alami, seperti hutan, mangrove, dan lahan basah, dapat membantu meningkatkan ketahanan terhadap dampak perubahan iklim. Ekosistem ini berfungsi sebagai penyangga terhadap bencana alam dan dapat menyerap karbon dioksida (Lim et al., 2022).
4. *Perencanaan Tata Ruang yang Adaptif*: Mengintegrasikan pertimbangan perubahan iklim dalam perencanaan tata ruang dan pembangunan infrastruktur. Ini termasuk

menghindari pembangunan di daerah rawan banjir dan meningkatkan ketahanan bangunan terhadap cuaca ekstrem (Saifudeen and Mani, 2024).

5. *Edukasi dan Kesadaran Masyarakat*: Tindakan kolektif dapat didorong dengan meningkatkan kesadaran masyarakat tentang perubahan iklim dan pentingnya adaptasi. Program edukasi dapat membantu masyarakat memahami risiko dan cara beradaptasi dengan perubahan yang terjadi (Siwi, 2022).
6. *Pengembangan Teknologi dan Inovasi*: Mendorong penelitian dan pengembangan teknologi yang dapat membantu masyarakat dalam menyesuaikan diri dengan perubahan iklim, seperti teknologi energi terbarukan, sistem pertanian cerdas, dan alat pemantauan cuaca (Nwankwo, Ukhurebor and Aigbe, 2020).
7. *Kebijakan dan Kerjasama Internasional*: Mengembangkan kebijakan yang mendukung adaptasi terhadap perubahan iklim dan mendorong kerjasama internasional untuk berbagi informasi dan sumber daya. Hal ini penting untuk menghadapi tantangan global yang dihadapi akibat pemanasan global (Biesbroek, 2021).

Menerapkan strategi adaptasi ini, memungkinkan masyarakat dapat meningkatkan ketahanan terhadap efek pemanasan global dan perubahan iklim serta melindungi lingkungan serta kehidupan mereka di masa depan.

## **G. Penutup**

Pemanasan global merupakan peningkatan suhu akibat gas rumah kaca, yang berkontribusi pada perubahan iklim global. Pemanasan global yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca, deforestasi, polusi dan transportasi, aktivitas industri, aktivitas pertanian dan peternakan, serta aktivitas

matahari telah menimbulkan perubahan iklim yang mengakibatkan terjadinya peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, gangguan ekosistem, perubahan migrasi spesies, kelangkaan sumberdaya alam, dan gangguan pada kesehatan lingkungan. Keanekaragaman hayati, ketahanan pangan, ketersediaan air, dan kesehatan manusia, terancam oleh dampak ini.

Dampak pemanasan global dan perubahan iklim yang cukup besar tersebut memerlukan tindakan mitigasi dan adaptasi yang cepat dan efektif untuk mengurangi dampak negatifnya dan menjaga keberlanjutan planet bumi. Mengurangi dampak pemanasan global dan perubahan iklim memerlukan tindakan kolektif dari berbagai sektor. Mengadopsi energi terbarukan, meningkatkan efisiensi energi, melakukan reforestasi, beralih ke transportasi dan pertanian berkelanjutan, mengelola sumber daya alam dengan bijak, mengurangi sampah, menetapkan kebijakan yang mendukung, dan meningkatkan kesadaran masyarakat, memungkinkan kita dapat memperlambat laju perubahan iklim dan melindungi planet bumi untuk generasi mendatang. Mitigasi harus dilakukan secara kolaboratif, melibatkan individu, pemerintah, dan komunitas global untuk mencapai hasil yang efektif. Demikian pula edukasi dan kesadaran masyarakat juga sangat penting untuk mendorong tindakan adaptif yang diperlukan. Mitigasi dan adaptasi harus berjalan beriringan untuk mengatasi tantangan ini secara efektif.

Pemanasan global dan perubahan iklim sangat berpengaruh pada sistem alam dan kehidupan manusia. Penanganannya membutuhkan kerja sama global dan perubahan signifikan dalam sistem energi, industri, dan gaya hidup. Solusi efektif mencakup pengurangan emisi besar-

besaran dan reforestasi memerlukan kolaborasi global agar target iklim seperti di Paris Agreement bisa dicapai yaitu menahan kenaikan suhu global “di bawah” 2 derajat Celcius di atas level pra-industri, dengan usaha maksimal untuk membatasi kenaikan suhu menjadi 1,5 derajat Celcius untuk mengurangi risiko dampak yang lebih besar dari perubahan iklim.

# Atmosfer dan Pencemaran Udara

## A. Pendahuluan

Atmosfer merupakan lapisan gas yang menyelimuti bumi dan berperan penting dalam menopang kehidupan. Komposisi atmosfer tersusun atas nitrogen (78%), oksigen (21%), serta gas-gas lain seperti argon, karbon dioksida, dan uap air dalam jumlah yang lebih kecil. Lapisan ini melindungi bumi dari radiasi berbahaya matahari dan menjaga suhu permukaan bumi tetap stabil melalui efek rumah kaca alami. Atmosfer juga menjadi medium utama dalam proses-proses cuaca dan iklim.

Secara vertikal, atmosfer terbagi menjadi beberapa lapisan berdasarkan perbedaan suhu, yaitu troposfer, stratosfer, mesosfer, termosfer, dan eksosfer. Troposfer merupakan lapisan terendah dan menjadi tempat berlangsungnya fenomena cuaca. Di atasnya terdapat stratosfer yang mengandung ozon dan berfungsi menyerap sinar ultraviolet. Pemahaman mengenai struktur atmosfer sangat penting untuk menilai dampak aktivitas manusia terhadap keseimbangan alam.

Selama ini, aktivitas manusia telah mengubah komposisi alami atmosfer. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca,

emisi partikulat, serta senyawa kimia berbahaya menyebabkan kerusakan pada kualitas udara dan sistem iklim global. Perubahan ini tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga pada kesehatan manusia dan keberlangsungan kehidupan makhluk hidup lainnya.

Pemahaman akan peran atmosfer dan bahayanya pencemarannya mendorong lahirnya berbagai kebijakan internasional seperti Protokol Montreal dan Konvensi Kerangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (UNFCCC). Peran serta masyarakat, dunia usaha, dan pemerintah menjadi faktor penentu dalam mengendalikan pencemaran udara dan menjaga kualitas atmosfer.

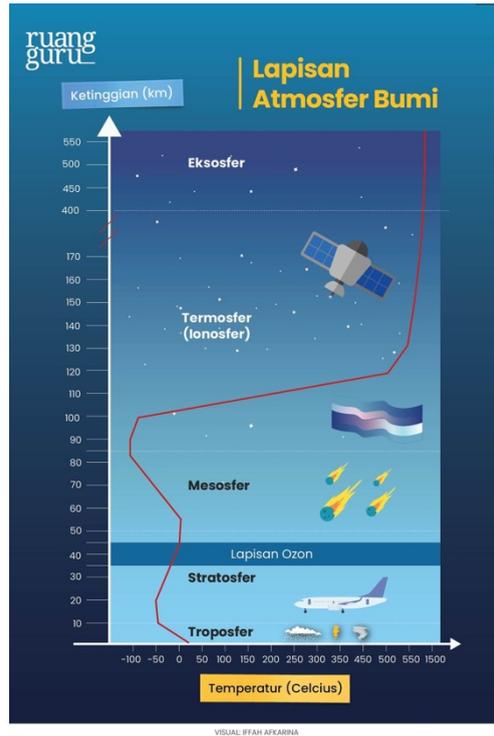
## **B. Komponen Atmosfer dan Peranannya**

Komponen utama atmosfer tidak hanya terdiri dari gas, tetapi juga partikel padat dan cairan dalam bentuk aerosol. Uap air, misalnya, memainkan peran penting dalam proses pembentukan awan dan hujan. Ozon (O<sub>3</sub>) di stratosfer melindungi kehidupan dari paparan sinar ultraviolet, tetapi ozon di troposfer justru menjadi polutan yang berbahaya.

Gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan metana (CH<sub>4</sub>) termasuk gas rumah kaca yang menyerap radiasi inframerah dan menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi. Meskipun keduanya terdapat secara alami, aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan pertanian mempercepat akumulasi gas ini di atmosfer. Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) menyebutkan bahwa konsentrasi CO<sub>2</sub> saat ini adalah yang tertinggi dalam 800.000 tahun terakhir.

Selain gas, partikel kecil seperti debu, jelaga, dan logam berat juga berkontribusi terhadap pencemaran udara. Partikel ini dapat berasal dari aktivitas alam seperti letusan gunung

berapi atau kebakaran hutan, serta dari aktivitas manusia seperti industri dan transportasi. Aerosol ini mampu memengaruhi pembentukan awan, mengganggu sistem pernapasan, dan menurunkan visibilitas.



**Gambar 7.** Lapisan Atmosfer Bumi (Zakaria, S., 2024)

### C. Jenis-Jenis Pencemaran Udara

Pencemaran udara dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis polutan, sumber pencemar, serta dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan. Polutan utama meliputi karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), ozon troposferik (O<sub>3</sub>), dan partikel tersuspensi (PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>). Polutan-polutan ini berasal dari sumber stasioner seperti pembangkit listrik dan industri, serta sumber bergerak seperti kendaraan bermotor.

Karbon monoksida terbentuk dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar dan sangat berbahaya karena dapat menggantikan oksigen dalam darah. Sulfur dioksida dan nitrogen oksida berkontribusi terhadap pembentukan hujan asam yang merusak vegetasi dan struktur bangunan. Ozon troposferik, meski bermanfaat di stratosfer, dapat menyebabkan iritasi pernapasan di permukaan bumi.

Partikel halus (PM<sub>2.5</sub>) mampu menembus saluran pernapasan hingga ke paru-paru dan menyebabkan gangguan jantung serta sistem pernapasan. Badan Kesehatan Dunia (WHO, 2022) melaporkan bahwa lebih dari 4 juta kematian setiap tahunnya berkaitan dengan paparan udara yang tercemar. Polutan sekunder, seperti ozon troposferik dan partikel sulfat, terbentuk dari reaksi kimia di atmosfer.

Pemantauan jenis dan konsentrasi polutan menjadi dasar dalam penetapan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Indonesia. Data ini penting untuk pengambilan kebijakan pembatasan aktivitas, seperti pembatasan lalu lintas dan penghentian operasi industri pada saat kondisi udara memburuk.

#### **D. Sumber Pencemaran Udara**

Sumber pencemaran udara terbagi atas dua kategori utama: sumber alami dan sumber antropogenik. Sumber alami mencakup letusan gunung berapi, kebakaran hutan, serta partikel debu dari gurun. Meski bersifat alami, sumber ini dapat memperburuk kualitas udara dalam skala regional dan bahkan global. Sebagai contoh, letusan Gunung Kelud tahun 2014 menyebabkan lonjakan partikel debu halus di wilayah Jawa Timur dan sekitarnya.

Sumber antropogenik adalah yang berasal dari aktivitas manusia, dan merupakan kontributor terbesar terhadap

pencemaran udara modern. Pembakaran bahan bakar fosil di sektor transportasi dan industri merupakan penyumbang utama emisi gas rumah kaca dan polutan berbahaya lainnya. Limbah dari aktivitas rumah tangga, seperti pembakaran sampah terbuka dan penggunaan bahan bakar padat untuk memasak, juga tidak bisa diabaikan.

Kegiatan pertanian juga menyumbang emisi amonia ( $\text{NH}_3$ ) yang berkontribusi pada pembentukan partikel sekunder. Pupuk dan limbah ternak menghasilkan senyawa yang bereaksi di atmosfer membentuk partikulat yang dapat membahayakan kesehatan. Di wilayah perkotaan, kombinasi dari berbagai sumber ini menciptakan campuran kompleks polutan yang sulit dikendalikan tanpa kebijakan yang ketat dan teknologi pemantauan canggih.

Kebijakan nasional dan pengawasan terhadap sumber pencemar menjadi sangat penting dalam menanggulangi permasalahan ini. Pemerintah Indonesia, misalnya, telah menerapkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2017 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak. Kebijakan ini menjadi acuan dalam menetapkan batas maksimal emisi dari sumber industri dan pembangkit listrik.

### **E. Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan**

Pencemaran udara memberikan dampak yang sangat serius terhadap kesehatan manusia, terutama dalam jangka panjang. Organ pernapasan adalah sistem tubuh yang pertama kali terpapar polutan. Partikel halus ( $\text{PM}_{2.5}$ ) yang terbawa udara dapat menembus sistem pernapasan hingga ke alveoli paru-paru dan menyebabkan peradangan kronis, asma, bronkitis, bahkan kanker paru-paru. Anak-anak dan

lansia merupakan kelompok yang paling rentan terhadap gangguan ini.

Menurut WHO (2018), lebih dari 90% populasi dunia hidup di lingkungan dengan kualitas udara di bawah standar kesehatan. Paparan kronis terhadap nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) dan ozon troposferik telah terbukti menyebabkan penurunan fungsi paru-paru dan meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular. Di Indonesia sendiri, peningkatan angka kunjungan ke rumah sakit untuk penyakit saluran pernapasan sering kali berhubungan dengan indeks kualitas udara yang memburuk.

Selain itu, dampak tidak langsung juga dapat terjadi. Polusi udara diketahui memicu gangguan sistem saraf, menurunkan fungsi kognitif, serta memperburuk kondisi penderita diabetes dan hipertensi. Studi oleh Harvard School of Public Health (2020) menunjukkan adanya korelasi antara tingginya polusi udara dengan meningkatnya tingkat kematian akibat infeksi COVID-19, memperlihatkan bagaimana pencemaran memperburuk kerentanan tubuh terhadap infeksi.

Biaya sosial dan ekonomi dari pencemaran udara sangat besar. Selain beban biaya perawatan kesehatan, penurunan produktivitas akibat sakit, serta absensi kerja dan sekolah, turut memberi dampak signifikan terhadap pembangunan sosial ekonomi. Oleh sebab itu, upaya pencegahan dan pengendalian polusi udara seharusnya menjadi bagian integral dari kebijakan pembangunan nasional.

## **F. Penutup**

Atmosfer merupakan sistem yang rapuh namun vital bagi keberlangsungan hidup di bumi. Ketika kualitas udara terganggu akibat pencemaran, dampaknya tidak hanya

dirasakan oleh lingkungan secara fisik, tetapi juga oleh seluruh ekosistem dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, menjaga atmosfer tetap bersih bukan sekadar isu lingkungan, melainkan juga menyangkut keberlanjutan kehidupan manusia di masa depan.

Berbagai upaya telah dilakukan, mulai dari regulasi internasional, kebijakan nasional, hingga kampanye kesadaran publik. Namun demikian, pencemaran udara masih menjadi tantangan besar, terutama di negara-negara berkembang yang tengah mengejar pertumbuhan ekonomi. Maka diperlukan sinergi antara sains, teknologi, kebijakan, dan kesadaran masyarakat agar perbaikan kualitas udara dapat berlangsung secara menyeluruh dan berkelanjutan.

Kesadaran individu untuk mengurangi jejak emisi, seperti menggunakan transportasi ramah lingkungan atau mengurangi pembakaran sampah, juga memegang peranan penting. Setiap tindakan kecil yang dilakukan secara kolektif akan menciptakan dampak besar bagi atmosfer. Masa depan bumi, dan generasi yang akan datang, sangat bergantung pada keputusan dan langkah yang kita ambil hari ini dalam menjaga kualitas udara yang kita hirup setiap detik.

# DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, I. (2020) Peran Penggunaan Energi Terbarukan dan Efisiensi Energi terhadap Emisi Karbon Dioksida di Negara- Negara Industri Baru. Universitas Lampung.
- Adamis, P. D. B. et al. (2003) 'Factors involved with cadmium absorption by a wild-type strain of *Saccharomyces cerevisiae*', *Brazilian Journal of Microbiology*, 34(1), pp. 55–60. doi: 10.1590/S1517-83822003000100012.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A. and Chaubey, I. (2012) 'Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research', *Water, Air, and Soil Pollution*, 223(7), pp. 4253–4273. doi: 10.1007/s11270-012-1189-2.
- Akimoto, H. (2016). *Atmospheric reaction chemistry*. Tokyo: Springer Japan.
- Akrofi MM, Okitasari M, Kandpal R (2022) Recent trends on the linkages between energy, SDGs and the Paris Agreement: a review of policy-based studies. *Discover Sustain* 3:32
- Ali, H., & Khan, E. (2017). *Environmental chemistry in the twenty-first century*. *Environmental Chemistry Letters*, 15(2), 329-346.
- Ali, M. A., Islam, M. A., & Uddin, M. T. (2021). Determination of nitrate and phosphate in surface water by UV-Vis spectrophotometry and its application. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2), 66. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08825-9>

- Ali, M. M. et al. (2020) 'Heavy metal concentrations in commercially valuable fishes with health hazard inference from Karnaphuli river, Bangladesh', *Human and Ecological Risk Assessment*, 26(10), pp. 2646–2662. doi: 10.1080/10807039.2019.1676635.
- Antarissubhi, H., Serang, R., Leda, J., Salamena, G. E., Pagoray, G. L., Gusty, S., ... & Safar, A. (2023). *Krisis Iklim Global di Indonesia (Dampak dan Tantangan)*. TOHAR MEDIA.
- APHA. (2020). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Badan Kesehatan Dunia (WHO). (2018). Ambient (outdoor) air pollution. Retrieved from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Badan Kesehatan Dunia (WHO). (2022). *Global Air Quality Guidelines*. Geneva: World Health Organization.
- Baker, cHutaf, Massadeh, A. and Yonnes, H. (2008) 'Natural\_Jordanian\_zeolite\_rem', *Environmental assess.*
- Bakirdere, S. and Yaman, M. (2008) 'Determination of lead, cadmium and copper in roadside soil and plants in Elazig, Turkey', *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3), pp. 401–410. doi: 10.1007/s10661-007-9695-1.
- Basuki, I. et al. (2022) 'Reforestation Opportunities in Indonesia: Mitigating Climate Change and Achieving Sustainable Development Goals', *Forests*, 13(447), pp. 1–15.

- Basuki, M. P. S., Lahati, B. K., Rahmah, N., Fitra, R. A., Adawiyah, R., Rachman, R. M., ... & Hidayat, B. (2023). Kesuburan tanah. Tohar Media.
- Bennett, R. J., & Chorley, R. J. (2015). Environmental systems: philosophy, analysis and control. Princeton University Press.
- Betaubun, R. J., Sriwati, M., Hasnawi, M., Rachman, R. M., & Ali, A. M. (2025). HIDROLOGI TERAPAN.
- Bhuyan, M. S. et al. (2017) 'Heavy metal contamination in surface water and sediment of the Meghna River, Bangladesh', Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management, 8(August 2016), pp. 273–279. doi: 10.1016/j.enmm.2017.10.003.
- Biesbroek, R. (2021) 'Policy Integration and Climate Change Adaptation', Current Opinion in Environmental Sustainability, 52, pp. 75–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.07.003>.
- Boucher, O., & Boucher, O. (2015). Atmospheric aerosols (pp. 9-24). Springer Netherlands.
- Buckner, C. A. et al. (2016) 'Heavy Metal Toxicity in Public Health', Intech, 11(tourism), p. 13. Available at: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- Chandrasekar, A. (2022). Basics of atmospheric science. PHI Learning Pvt. Ltd..
- Chang, H. Y. D. (2015). Assessing impact of the sulfate aerosol first indirect effect on tropical cyclone activity

(Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Chaplin, M. (2021). The unusual properties of water. *Annual Reports on the Progress of Chemistry, Section C*, 117, 1–24. <https://doi.org/10.1039/D1CS00500J>

Chen, B. et al. (2022) 'Geochemical Speciation, Risk Assessment, and Sources Identification of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments from the Nanliu River Estuary of the Beibu Gulf, China', *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). doi: 10.3390/su14159112.

Chen, X. et al. (2010) 'Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China', *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), pp. 640–646. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.060.

Chibuikwe, G. U. and Obiora, S. C. (2014) 'Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods', *Applied and Environmental Soil Science*, 2014(August 2014). doi: 10.1155/2014/752708.

Chiew, F. H. S. (2024) 'Climate Change and Water Resources', *Australasian Journal of Water Resources*, 28(1), pp. 6–17. doi: <https://doi.org/10.1080/13241583.2024.2341920>.

Chipperfield, M. P., Bekki, S., Dhomse, S., Harris, N. R., Hassler, B., Hossaini, R., ... & Weber, M. (2017). Detecting recovery of the stratospheric ozone layer. *Nature*, 549(7671), 211-218.

Cieśla, Ł., & Moaddel, R. (2016). Comparison of analytical techniques for the identification of bioactive

compounds from natural products. *Natural product reports*, 33(10), 1131-1145.

Conant, J. K., & Balint, P. J. (2016). *The Life Cycles of the Council on Environmental Quality and the Environmental Protection Agency: 1970-2035*. Oxford University Press.

Cristaldi, A. et al. (2017) 'Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review', *Environmental Technology and Innovation*, 8, pp. 309–326. doi: 10.1016/j.eti.2017.08.002.

Daoust, G. and Selby, J. (2024) 'Climate Change and Migration: A Review and New Framework for Analysis', *WIREs Climate Change*, 15(4), pp. 1–18. doi: 10.1002/wcc.88.

Das, P., Samantaray, S. and Rout, G. R. (1997) 'Studies on cadmium toxicity in plants: A review', *Environmental Pollution*, 98(1), pp. 29–36. doi: 10.1016/S0269-7491(97)00110-3.

De Gisi, S. et al. (2021) 'Stabilization/solidification of contaminated marine sediment', in *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes*, pp. 113–127. doi: 10.1016/B978-0-12-824004-5.00004-9.

De Voogt, P. (2015) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. doi: 10.1007/978-3-319-20013-2.

Din, A. U. et al. (2023) 'How Sustainable Transportation Can Utilize Climate Change Technologies to Mitigate Climate Change', *Sustainability*, 15(9710), pp. 1–22.

- Ding, L. et al. (2018) 'Distribution and speciation of mercury affected by humic acid in mariculture sites at the Pearl River estuary', *Environmental Pollution*, 240, pp. 623–629. doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.142.
- Dixit, R. et al. (2015) 'Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes', *Sustainability (Switzerland)*, 7(2), pp. 2189–2212. doi: 10.3390/su7022189.
- Duffus, J. H. (2002) "'heavy metals" - A meaningless term? (IUPAC technical report)', *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), pp. 793–807. doi: 10.1351/pac200274050793.
- El-Serehy, H. A., Al-Misned, F. A., Al-Rasheid, K. A. S., & Abdelrahman, N. S. (2022). Assessment of water quality parameters in relation to fish biodiversity in freshwater ecosystems. *Ecological Indicators*, 140, 109028. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109028>
- El-Sharkawy, M. et al. (2025) 'Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review', *Sustainability (Switzerland)*, 17(2), pp. 1–29. doi: 10.3390/su17020701.
- El-Sorogy, A. et al. (2018) 'Distribution and metal contamination in the coastal sediments of Dammam Al-Jubail area, Arabian Gulf, Saudi Arabia', *Marine Pollution Bulletin*, 128(December 2017), pp. 8–16. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.12.066.
- Evstropov, V., Trushkova, E., & Nikhayeva, A. (2019). Recent research questions of ecological aspects of the interaction of the organism and the environment.

Научный альманах стран Причерноморья, (3 (19)), 41-51.

Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O. *Science of The Total Environment*, 173359.

Firmansyah, I. L. et al. (2024) 'Dampak Perubahan Iklim dapat Meningkatkan Kebakaran Hutan dan Upaya Pelestarian Lingkungan', *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 2(2), pp. 88–100.

Fountain, M. J. et al. (2024) 'Desain Implementasi Modul GSM (Global System for Mobile Communication) dalam Monitoring Polusi Udara sebagai Faktor Pemanasan Global', *ransient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 13(1), pp. 37–45. doi: <https://doi.org/10.14710/transient.v13i1.37-45>.

Ganguly, R., Kumar, A., & Singh, D. (2021). Emerging contaminants in water: Occurrence, detection and remediation. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 4075–4097. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01261-4>

Gill, A. E. (2016). *Atmosphere—ocean dynamics*. Elsevier.

Giller, K. E., Witter, E. and Mcgrath, S. P. (1998) 'Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: A review', *Soil Biology and Biochemistry*, 30(10–11), pp. 1389–1414. doi: [10.1016/S0038-0717\(97\)00270-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00270-8).

- Gökkür, S., Çağır, F. and Arda, E. (2022) 'Climate Change and Sustainable Agriculture', *Journal for the Agriculture, Biotechnology and Education*, 2(2), pp. 63–74.
- Goudie, A. S. (2018). *Human impact on the natural environment: Past, present and future*. John Wiley & Sons.
- Gudmanian, A., Yahodzinskyi, S., Koshetar, U., & Orochovska, L. (2020). Social and economic aspects of environmental problems in the globalized world. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 164, p. 11019). EDP Sciences.
- Hakim, L. and Anjasmara, I. M. (2016) 'Analisa Hubungan Perubahan Muka Air Laut dan Perubahan Volume Es di Kutub Selatan dengan Menggunakan Satelit Altimetri (Studi Kasus: Laut Selatan Pulau Jawa Tahun 2011 - 2014)', *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), pp. 395–400.
- Hanif, M. A., Nadeem, F., Bhatti, I. A., & Tauqeer, H. M. (2020). *Environmental chemistry: a comprehensive approach*. John Wiley & Sons.
- Harvard T.H. Chan School of Public Health. (2020). *Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study*. Boston: Harvard University.
- Hasan, M. M., Uddin, M. T., & Zaman, S. (2021). Heavy metals in industrial effluents and their impacts on water quality: A case study from developing countries. *Journal of Environmental Management*, 292, 112777. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112777>

- Helmenstine, A. M. (2022, May 3). Layers of the atmosphere. Science Notes. <https://sciencenotes.org/layers-of-the-atmosphere/>
- Hidayat, A., Bungin, E. R., Muliawan, I. W., Masgode, M. B., Rachman, R. M., Sarie, F., ... & Rustam, M. S. P. A. (2023). Polusi dan Lingkungan. TOHAR MEDIA.
- Hossain, M. B. et al. (2021) 'Contamination levels and ecological risk of heavy metals in sediments from the tidal river Halda, Bangladesh', *Arabian Journal of Geosciences*, 14(3). doi: 10.1007/s12517-021-06477-w.
- Huang, G. et al. (2023) 'Spatiotemporal Patterns of Heavy-Metal Pollution in Coastal Pinqing Lagoon (Southern China): Anthropogenic and Hydrological Effect', *Water (Switzerland)*, 15(17), pp. 1–20. doi: 10.3390/w15173126.
- Ilyinskaya, E. et al. (2021) 'Rapid metal pollutant deposition from the volcanic plume of Kīlauea, Hawai'i', *Communications Earth and Environment*, 2(1), pp. 1–16. doi: 10.1038/s43247-021-00146-2.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Sixth Assessment Report: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Irianto et al. (2024) 'Sosialisasi Perubahan Iklim dan Krisis Air', *Jurnal Pakem AMATA* Vol. 4No. 1(2024), 4(1), pp. 1–5.
- Jacob, D.J. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

- Jaglal, K. (2020) 'Contaminated aquatic sediments', *Water Environment Research*, 92(10), pp. 1826–1832. doi: 10.1002/wer.1443.
- Jain, N., Bhatia, A., Pathak, H., Gupta, N., Sharma, D. K., & Kaushik, R. (2015). Greenhouse gas emission and global warming. *Introduction to environmental sciences*, 379-411.
- Järup, L. (2003) 'Hazards of heavy metal contamination', *British Medical Bulletin*, 68, pp. 167–182. doi: 10.1093/bmb/ldg032.
- Ju, S. et al. (2011) 'Clean hydrometallurgical route to recover zinc, silver, lead, copper, cadmium and iron from hazardous jarosite residues produced during zinc hydrometallurgy', *Journal of Hazardous Materials*, 192(2), pp. 554–558. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.049.
- Kahal, A. et al. (2020) 'Contamination and ecological risk assessment of the Red Sea coastal sediments, southwest Saudi Arabia', *Marine Pollution Bulletin*, 154(February), p. 111125. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111125.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2017). Peraturan Menteri LHK No. P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2017 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak. Jakarta.
- Khan, A., Jamil, M., & Khan, S. (2021). Development and application of a simplified water quality index for monitoring rivers in urban areas. *Water*, 13(10), 1391. <https://doi.org/10.3390/w13101391>

- Khan, M. B. et al. (2019) 'Toxic Metal Pollution and Ecological Risk Assessment in Sediments of Water Reservoirs in Southeast China', *Soil and Sediment Contamination*, 28(7), pp. 695–715. doi: 10.1080/15320383.2019.1657065.
- Kim, J. J., Kim, Y. S. and Kumar, V. (2019) 'Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies', *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 54, pp. 226–231. doi: 10.1016/j.jtemb.2019.05.003.
- Kinimo, K. C. et al. (2018) 'Distribution trends and ecological risks of arsenic and trace metals in wetland sediments around gold mining activities in central-southern and southeastern Côte d'Ivoire', *Journal of Geochemical Exploration*, 190, pp. 265–280. doi: 10.1016/j.gexplo.2018.03.013.
- KLHK. (2023). *Status Lingkungan Hidup Indonesia 2023*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Kogan, V. E., & Shakhparonova, T. S. (2017). Chemistry as a basis for solving environmental issues. *Записки Горного института*, 224, 223-228.
- Komarudin, N. A. et al. (2022) 'Edukasi Pertanian Ramah Lingkungan Sebagai Upaya Mitigasi Efek Gas Rumah Kaca di Desa Pungka, Kabupaten Sumbawa', *Jurnal Abdimas Madani dan Lestari (JAMALI)*, 4(2), pp. 111–119.
- Kotian, C. (2025) 'Heavy Metal Pollution in India : Current Trends and Perspectives', 10(March), pp. 158–165.
- Kumar, A. et al. (2023) 'Waste Management and its Impacts on Climate Change – A Review', in Chaudhary, V. K. et al.

(eds) Environment and Society 2023. New Delhi: Nature Light Publications, pp. 146–156.

Kumar, D. and Khan, E. A. (2020) Remediation and detection techniques for heavy metals in the environment, Heavy Metals in the Environment: Impact, Assessment, and Remediation. doi: 10.1016/B978-0-12-821656-9.00012-2.

Kumar, K. A., & Karthika, K. S. (2020). Abiotic and biotic factors influencing soil health and/or soil degradation. *Soil Health*, 145-161.

Kurniawan, E. A. D., Fatmawati and Miswanto (2021) 'Modeling of global warming effect on the melting of polar ice caps with optimal control analysis', in International Conference on Mathematics, Computational Sciences and Statistics. Surabaya. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0042360>.

Kurniawan, E. D., Hartanto, S. and Susi, T. (2023) 'Dampak Perubahan Penggunaan Lahan Terhadap Jumlah Stok Karbon dan Penanganan Berkelanjutan', in Seminar Nasional Sinergitas Era Digital 5.0 dalam Pembangunan Teknologi Hijau Berkelanjutan. Malang: Institut Teknologi Nasional Malang, pp. 165–172.

Kushawaha, J. et al. (2021) 'Climate Change and Its Impact on Natural Resources', in Water Conservation in the Era of Global Climate Change. Elsevier, pp. 333–346. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00002-6>.

Larson, R. (2018). Reaction mechanisms in environmental organic chemistry. Routledge.

Lawrence, D. et al. (2022) 'The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on Climate', Original Research,

5(756115), pp. 1–13. doi:  
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.756115>.

- Lee, P. K. et al. (2019) 'Source identification of arsenic contamination in agricultural soils surrounding a closed Cu smelter, South Korea', *Chemosphere*, 217, pp. 183–194. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.010.
- Li, Y., Zhang, H., & Zhao, Y. (2021). Redox processes and their environmental implications in aquatic systems: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 1025–1044. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01102-3>
- Lian, M. et al. (2019) 'Profiles and potential health risks of heavy metals in soil and crops from the watershed of Xi River in Northeast China', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169(August 2018), pp. 442–448. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.11.046.
- Lim, C. H. et al. (2022) 'Climate Change Adaptation Through Ecological Restoration', in *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability*. Elsevier, pp. 151–172. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00013-2>.
- Liu, P. et al. (2020) 'Accumulation and ecological risk of heavy metals in soils along the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea: A comparative study of China and South Korea', *Environment International*, 137(October 2019), p. 105519. doi: 10.1016/j.envint.2020.105519.
- Liu, Y. et al. (2015) 'Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff', *Journal of Environmental Management*, 147, pp. 12–23. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.09.005.

- Liu, Y. et al. (2017) 'A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities', *Science of the Total Environment*, 601–602, pp. 580–593. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.212.
- Liu, Y., Bralts, V. F. and Engel, B. A. (2015) 'Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model', *Science of the Total Environment*, 511, pp. 298–308. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.077.
- Lofrano, G. et al. (2017) 'In situ remediation of contaminated marinesediment: an overview', *Environmental Science and Pollution Research*, 24(6), pp. 5189–5206. doi: 10.1007/s11356-016-8281-x.
- Ma'ayan, A. (2017). *Complex systems biology*. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(134), 20170391.
- Manahan, S. E. (2022). *Environmental chemistry*. CRC press.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 14.
- Marchand, C. et al. (2006) 'Heavy metals distribution in mangrove sediments along the mobile coastline of French Guiana', *Marine Chemistry*, 98(1), pp. 1–17. doi: 10.1016/j.marchem.2005.06.001.
- Mayes, R., & Myers, J. (2015). *Quantitative reasoning in the context of energy and environment: Modeling problems in the real world*. Springer.

- Mehaffy, M., & Salingaros, N. A. (2017). Design for a living planet: Settlement, science, & the human future. Sustasis Press.
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2021). Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design. John Wiley & Sons.
- Mitra, S., & Kebbekus, B. B. (2018). Environmental chemical analysis. CRC Press.
- Mohammad Ali, M. et al. (2021) 'Environmental Pollution with Heavy Metals: A Public Health Concern', Heavy Metals - Their Environmental Impacts and Mitigation, (June). doi: 10.5772/intechopen.96805.
- Murphy, P. et al. (2006) 'Predicting the Performance of Activated Carbon-, Coke-, and Soil-Amended Thin Layer Sediment Caps', Journal of Environmental Engineering, 132(7), pp. 787–794. doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2006)132:7(787).
- NASA Earth Observatory. (2019). What's in the Air? Understanding Earth's Atmosphere. Retrieved from: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Atmosphere>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2025) Climate Change. Available at: <https://science.nasa.gov/climate-change/> (Accessed: 5 June 2025).
- NEXT IAS Contributors. (2024, August 13). Components of ecosystem: Abiotic & biotic components. NEXT IAS. <https://www.nextias.com/blog/components-of-ecosystem/>

- Nguyen, T. H., Pham, H. Q., & Bui, T. Q. (2021). Real-time water monitoring with automatic sampling and IoT technology. *Water Resources Management*, 35(9), 2897–2912. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02860-9>
- Noe, G. B. et al. (2020) ‘Sediment dynamics and implications for management: State of the science from long-term research in the Chesapeake Bay watershed, USA’, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(4), pp. 1–28. doi: 10.1002/wat2.1454.
- Noman, M. A. et al. (2022) ‘Bioaccumulation and potential human health risks of metals in commercially important fishes and shellfishes from Hangzhou Bay, China’, *Scientific Reports*, 12(1). doi: 10.1038/s41598-022-11186-9.
- Nour, H. E. and El-Sorogy, A. S. (2017) ‘Distribution and enrichment of heavy metals in Sabratha coastal sediments, Mediterranean Sea, Libya’, *Journal of African Earth Sciences*, 134, pp. 222–229. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.06.019.
- Nour, H. E. et al. (2019) ‘Contamination and ecological risk assessment of heavy metals pollution from the Shalateen coastal sediments, Red Sea, Egypt’, *Marine Pollution Bulletin*, 144(March), pp. 167–172. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.056.
- Nwankwo, W., Ukhurebor, K. E. and Aigbe, U. O. (2020) ‘Climate Change and Innovation Technology: A Review’, *Technology Reports of Kansai University*, 63(3), pp. 383–391.
- Okunola, O. J., Uzairu, A. and Ndukwe, G. (2007) ‘Levels of trace metals in soil and vegetation along major and

- minor roads in metropolitan city of Kaduna, Nigeria', *African Journal of Biotechnology*, 6(14), pp. 1703–1709.
- Omwene, P. I. et al. (2018) 'Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpaşa stream located in the world's largest borate basin (Turkey)', *Chemosphere*, 208, pp. 782–792. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.031.
- Palermo, M. et al. (2014) 'Processes, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments', 6, pp. 365–391. doi: 10.1007/978-1-4614-6726-7.
- Pan, Y. et al. (2022) 'Control of Endogenous Phosphorus Release at the Sediment–Water Interface by Lanthanum-Modified Fly Ash', *Coatings*, 12(6). doi: 10.3390/coatings12060719.
- Päschke, E., Leinweber, R., & Lehmann, V. (2015). An assessment of the performance of a 1.5 µm Doppler lidar for operational vertical wind profiling based on a 1-year trial. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(6), 2251-2266.
- Peng, W. et al. (2018) 'Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals', *Journal of Soils and Sediments*, 18(4), pp. 1701–1719. doi: 10.1007/s11368-018-1921-7.
- Petrov, M., Nikolaeva, Z., & Dimitrov, A. (2023). The impact of anthropogenic activity on the global environment. *Science. Business. Society.*, 8(2), 59-64.
- Pogorilic, S., Vitezica, P. and Bolanca, S. (2011) 'PHP48 Croatian Pharmaceutical Expenditure Before and After Healthcare Reform – Comparison to EU Countries',

Value in Health, 14(7), pp. A341–A342. doi: 10.1016/j.jval.2011.08.599.

Proshad, R. et al. (2018) 'Heavy metal toxicity in agricultural soil due to rapid industrialization in Bangladesh: a review', *International Journal of Advanced Geosciences*, 6(1), p. 83. doi: 10.14419/ijag.v6i1.9174.

Rachman, R. M., Leda, J., Lorens, D., Putri, T. S., Saptaputra, S. K., & Mustika, W. (2024). Higiene dan toksikologi industri. TOHAR MEDIA.

Rahman, M. S., Khan, M. N., & Jolly, Y. N. (2021). Impact of suspended solids on aquatic ecosystems and drinking water quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3784–3796. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10794-4>

Raimi, M. O., Abiola, I., & Omini, D. E. (2021). Exploring how human activities disturb the balance of biogeochemical cycles: Evidence from the carbon, nitrogen and hydrologic cycles. *Nitrogen and Hydrologic Cycles* (July 30, 2021).

Ramadhani, P. and Venusita, L. (2020) 'Tipe Industri dan Kualitas Pengungkapan Emisi Karbon di Indonesia', *AKUNESA: Jurnal Akuntansi Unesa*, 8(3).

Rao, S., Pradhan, A. K., & Mishra, B. K. (2022). Municipal wastewater as a source of emerging pollutants: A review on occurrence, fate, and removal technologies. *Science of The Total Environment*, 817, 152792. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152792>

Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Vo, D. V. N. (2021). Critical review on hazardous pollutants in water environment:

Occurrence, monitoring, fate, removal technologies and risk assessment. *Science of The Total Environment*, 797, 149134.

Reitner, J. and Thiel, V. (2011) Heavy metals, *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. doi: 10.1007/978-1-4020-9212-1\_109.

Rustan, F. R., Tanje, H. W., Sukri, A. S., Amir, M. K., Sriwati, M., & Rachman, R. M. (2024). *Hidrologi*. TOHAR MEDIA.

Safar, A., Saudi, A. I., Ampangallo, B. A., Yunus, A. Y., Sampe, R., & Rachman, R. M. (2024). *Transportasi Publik*. TOHAR MEDIA.

Saifudeen, A. and Mani, M. (2024) 'Adaptation of Buildings to Climate Change: An Overview', *Frontiers in Built Environment*, 10:1327747, pp. 1–17. doi: 10.3389/fbuil.2024.1327747.

Samidjo, J. and Suharso, Y. (2017) 'Memahami Pemanasan Global dan Perubahan Iklim', *Pawiyatan*, 24(2), pp. 1–10.

Sánchez, F., Torres, L. A., & Medina, C. (2023). Complexation and precipitation of heavy metals in aquatic environments: A mechanistic approach. *Environmental Pollution*, 317, 120854. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120854>

Sarwar, N. et al. (2017) 'Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives', *Chemosphere*, 171, pp. 710–721. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.116.

Saxena, V. (2025). Water Quality, Air Pollution, and Climate Change: Investigating the Environmental Impacts of Industrialization and Urbanization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(2), 1-40.

Sedyaaw, P., Kawade, S. S., Bhaladhare, R. D., Pranali, K., & Pandey, A. (2024). Causes, Effects and Management Measures of Acid Rain: A Review. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*, 39(3), 215-222.

Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

Siagian, H. F. A. S. (2023) Pemanasan Global, Penyebab, Dampak, dan Cara Menyikapi serta Menanggulangnya. Available at: <https://www.djkn.kemenkeu.go.id/kpknl-lahat/baca-artikel/16465/ Pemanasan-Global-Penyebab-Dampak-dan-Cara-Menyikapi-serta-Menanggulangnya.html> (Accessed: 5 June 2025).

Silva, T. P. et al. (2024) 'Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production', *International Soil and Water Conservation Research*, 12(1), pp. 121–136. doi: 10.1016/j.iswcr.2023.06.003.

Singh, R. P., Mishra, S., & Kumar, S. (2021). Organic pollutants in freshwater ecosystems: Sources, effects, and remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111887>

Singh, U. K. and Kumar, B. (2017) 'Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in

Ajay River basin, India', *Chemosphere*, 174, pp. 183–199. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.103.

Singh, V. et al. (2023) 'Heavy Metal Contamination in the Aquatic Ecosystem : Toxicity', *Toxics*, 11(2), p. 147.

Siwi, S. H. (2022) 'Dwelling and the Environment: Community-Based Adaptation and Mitigation to Climate Change', *International Journal of Built Environment and Scientific Research*, 6(2), pp. 153–166.

Smirnov, B. M. (2020). *Global Atmospheric Phenomena Involving Water*. Switzerland, Springer Atmospheric Series.

Society, T. R. (2025) *The Basics of Climate Change*. Available at: <https://royalsociety.org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/basics-of-climate-change/> (Accessed: 5 June 2025).

Song, Y. et al. (2019) 'Nature based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: A review', *Science of the Total Environment*, 663, pp. 568–579. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.347.

Su, C., Jiang, L. and Zhang, W. (2014) 'A review on heavy metal contamination in the soil worldwide : Situation , impact and remediation techniques', 3(2), pp. 24–38.

Sukmawati, M. L. and Hariyani, H. F. (2025) 'Dampak Investasi Energi Terbarukan Terhadap Emisi Karbon di Negara OECD', *Journal of Financial Economics & Investment*, 5(5), pp. 1–13.

Suvarapu, L. N. and Baek, S. O. (2017) 'Determination of heavy metals in the ambient atmosphere: A review',

Toxicology and Industrial Health, 33(1), pp. 79–96. doi: 10.1177/0748233716654827.

Syamsudin, F. I. (2018) 'Analisis Pengaruh Aktivitas Matahari Terhadap Perubahan Iklim', in Seminar Nasional Pendidikan Sains (SNPS). Surakarta, pp. 179–183.

Syberg, K., & Hansen, S. F. (2016). Environmental risk assessment of chemicals and nanomaterials—the best foundation for regulatory decision-making?. *Science of the Total Environment*, 541, 784-794.

T.H., U., B.M., S. M. and M., M. (2016) 'Impact of Climate Change on Rainfall Pattern and Reservoir Level', *Journal of Water Resource Engineering and Management*, 3(1), pp. 10–14.

Tanaskovski, B. et al. (2014) 'Analysis of major, minor and trace elements in surface sediments by x-ray fluorescence spectrometry for assessment of possible contamination of Boka Kotorska Bay, Montenegro', *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 33(1), pp. 139–150. doi: 10.20450/mjcce.2014.423.

Tang, K. H. D. (2022) 'A model of Behavioral Climate Change Education for Higher Educational Institutions', *Environmental Advances*, 9(100305), pp. 1–9.

Tanje, H. W., Sukri, A. S., Amir, M. K., Syajruddin, M. S., Rachman, R. M., & Bungin, E. R. (2024). *HIDROLOGI*.

Tchounwou, P. B. (2008) 'Arsenic toxicity and carcinogenesis: A public health risk assessment and management approach', *WIT Transactions on Ecology and the*

Environment, 110(April 2008), pp. 71–79. doi: 10.2495/ETOX080081.

Tian, K. et al. (2017) 'Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China', *Ecological Indicators*, 72, pp. 510–520. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.08.037.

Timofeev, I., Kosheleva, N. and Kasimov, N. (2018) 'Contamination of soils by potentially toxic elements in the impact zone of tungsten-molybdenum ore mine in the Baikal region: A survey and risk assessment', *Science of the Total Environment*, 642, pp. 63–76. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.042.

Tjiwidjaja, H. and Salima, R. (2023) 'Dampak Energi Fosil Terhadap Perubahan Iklim dan Solusi Berbasis Energi Hijau', *Jurnal Wilayah, Kota dan Lingkungan Berkelanjutan*, 2(2), pp. 166–172. doi: <https://doi.org/10.58169/jwikal.v2i2.625>.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Particulate Matter (PM2.5) Trends. Retrieved from: <https://www.epa.gov/air-trends/particulate-matter-pm25-trends>

UNESCO. (2024). *World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris: UNESCO.

Ustaoğlu, F. and Islam, M. S. (2020) 'Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: A preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk', *Ecological Indicators*, 113(February). doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106237.

- Vallero, D. A. (2015). *Environmental biotechnology: a biosystems approach*. Academic press.
- Varol, M. et al. (2020) 'Trace metals in core sediments from a deep lake in eastern Turkey: Vertical concentration profiles, eco-environmental risks and possible sources', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189(October 2019). doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110060.
- Verma, K. K. et al. (2025) 'Climate Change Adaptation: Challenges for Agricultural Sustainability', *Plant, Cell & Environment*, 48(4), pp. 2522–2533. doi: <https://doi.org/10.1111/pce.15078>.
- Viana, L. F. et al. (2023) 'Bioaccumulation of metals and genotoxic effects in females of *Colomesus asellus* collected in an Amazon River estuary, Amapá, Brazil', *Limnetica*, 42(2), pp. 203–214. doi: 10.23818/limn.42.15.
- Von Schneidemesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., ... & Sutton, M. A. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical reviews*, 115(10), 3856-3897.
- Wang, L. et al. (2017) 'A review on in situ phytoremediation of mine tailings', *Chemosphere*, 184, pp. 594–600. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.06.025.
- Wang, Y., Zhang, L., & Guo, Y. (2023). Characterization of suspended and dissolved solids in water bodies influenced by agriculture and urbanization. *Science of the Total Environment*, 879, 162755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162755>

- Weerasinghe, A. and Ariyawansa, S. (2008) 'Phytoremediation potential of *Ipomoea aquatica* for Cr (VI) mitigation', *Chemosphere*, 70, pp. 521–524. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.07.006.
- WHO. (2021). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). World Health Organization.
- World Meteorological Organization (2024) *Global Temperature Record Streak Continues, as Climate Change Makes Heatwaves More Extreme*. Available at: <https://wmo.int/media/news/global-temperature-record-streak-continues-climate-change-makes-heatwaves-more-extreme> (Accessed: 8 June 2025).
- World Meteorological Organization (WMO). (2020). *State of the Global Climate Report 2020*. Geneva: WMO.
- Wu, Z., Geng, J. and Huang, L. (2015) 'Heavy metal contamination in sediments and mangroves from maowei gulf, south china', *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(3B), pp. 1091–1097.
- Xie, X., Semanjski, I., Gautama, S., Tsiligianni, E., Deligiannis, N., Rajan, R. T., ... & Philips, W. (2017). A review of urban air pollution monitoring and exposure assessment methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 389.
- Yabe, J., Ishizuka, M. and Umemura, T. (2010) 'Current levels of heavy metal pollution in Africa', *Journal of Veterinary Medical Science*, 72(10), pp. 1257–1263. doi: 10.1292/jvms.10-0058.
- Yan, X. et al. (2012) 'Relationship between heavy metal concentrations in soils and grasses of roadside

farmland in Nepal', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(9), pp. 3209–3226. doi: 10.3390/ijerph9093209.

Yekeen, T. a, Onifade, T. O. and Biology, A. (2012) 'Evaluation of some Heavy Metals in Soils along a Major Road in', 2(8), pp. 71–79.

Yeongkyoo, K. (2018) 'Effects of different oxyanions in solution on the precipitation of jarosite at room temperature', *Journal of Hazardous Materials*, 353(May 2017), pp. 118–126. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.016.

Yunus, A. Y., Ahmad, S. N., Latief, R., Mulfiyanti, D., Badrun, B., Syarif, M., Rachman, R. M., Sya'ban, A. R., Wulansari, I., & Aryadi, A. (2024). *Bencana alam dan manajemen risiko bencana* (Jilid 1, hlm. 192). Tohar Media.

Zakaria, S. (2024, 29 Oktober). 5 macam lapisan atmosfer bumi, karakteristik, fungsi & ketinggiannya. Ruangguru. Diakses Juli 2025, dari Ruangguru website

Zeebe, R. E. (2022). Ocean carbonate chemistry and buffering capacity. *Earth and Planetary Science Letters*, 578, 117290. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117290>

Zhang, C. et al. (2019) 'Identifying sediment-associated toxicity in rivers affected by multiple pollutants from the contaminant bioavailability', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171(December 2018), pp. 84–91. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.075.

Zhang, H., Chen, L., & Wang, Y. (2023). Agricultural runoff and eutrophication in freshwater lakes: Mechanisms

and mitigation. *Environmental Pollution*, 317, 120847.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120847>

Zhang, H., Han, X., Wang, G., Mao, H., Chen, X., Zhou, L., ... & Yan, X. (2023). Spatial distribution and driving factors of groundwater chemistry and pollution in an oil production region in the Northwest China. *Science of the Total Environment*, 875, 162635.

Zhang, W., Zhang, S., & Wang, J. (2022). Microplastics in freshwater systems: A global review of occurrence, fate, and ecological risks. *Water Research*, 217, 118368.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118368>

Zhao, Y., Zhang, L., & Li, X. (2020). Eutrophication in freshwater ecosystems: Causes, consequences, and management strategies. *Environmental Pollution*, 261, 114089. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114089>

Zhuang, Y. et al. (2016) 'Current patterns and future perspectives of best management practices research: A bibliometric analysis', *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(4), pp. 98A-104A. doi: 10.2489/jswc.71.4.98A.

Zulfa, V. and Septiana, A. (2024) 'Impact of Climate Change on Environmental Health: Challenges and Opportunities to Improve Quality of Life', *Environment Education and Conservation (EDUCO)*, 1(1), pp. 1–6.

# BIOGRAFI PENULIS



**Dr. Ir. Ranno Marlany Rachman, S.T., M.Kes.**

Lahir di Wua-Wua, Sulawesi Tenggara, pada 9 Desember 1980. Menyelesaikan pendidikan Sarjana di bidang Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Yogyakarta pada tahun 2003, kemudian melanjutkan studi Magister di bidang Kesehatan Lingkungan di Universitas Diponegoro, Semarang, dan lulus pada tahun 2008. Gelar Doktor diperoleh pada tahun 2018 dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, dengan fokus pada bidang Teknik Lingkungan.

Saat ini, aktif sebagai dosen tetap di Program Studi Rekayasa Infrastruktur Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo (UHO), Kendari, Sulawesi Tenggara. Aktivitas akademik sehari-hari mencakup pengajaran, penelitian, serta pengabdian kepada masyarakat, dengan bidang kajian utama meliputi teknik lingkungan, kesehatan masyarakat, sanitasi, pembangunan infrastruktur berkelanjutan, serta mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Telah berkontribusi dalam penulisan lebih dari 50 judul buku chapter dan referensi ilmiah. Beberapa karya penting di antaranya: Remediasi Timbunan Tailing Berbasis Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi, Ekotoksikologi: Pencemaran, Restorasi, dan Masa Depan, Pencemaran Air, Mitigasi Bencana, Polusi dan Lingkungan, Beton Pracetak, Krisis Iklim Global di Indonesia, Analisis Kualitas Lingkungan, dan Toksikologi. Melalui karya-karya tersebut, penulis menunjukkan dedikasi yang tinggi dalam mendorong

penguatan ilmu pengetahuan yang aplikatif untuk menjawab berbagai tantangan lingkungan, baik di tingkat lokal, nasional, maupun global.



**Hanizah Baturante**, Lahir di Sambueja Maros, pada tanggal 24 Agustus 1982. Menyelesaikan S1 Jurusan Kimia MIPA UNHAS tahun 2007, S2 di Program Magister Ilmu Kesehatan Masyarakat Program Pasca Sarjana UNHAS (PPS) tahun 2009. Aktivitas saat ini adalah sebagai ASN pada Dinas Sosial Provinsi

Sulawesi Selatan.



**Dr. Jenny Delly**, Lahir di Kendari, pada tanggal 10 Maret 1972. Menyelesaikan S1 Jurusan Teknik Mesin UNHAS tahun 1995, S2 di Program Magister di Jurusan Teknik Mesin Program Pasca Sarjana ITS tahun 2005 dan Program Doktor S3 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Ilmu Lingkungan Universitas

Indonesia tahun 2023. Aktivitas saat ini adalah sebagai salah satu dosen tetap Universitas Halu Oleo pada Fakultas Teknik Jurusan Mesin, dan telah menulis beberapa buah buku diantaranya Dasar Teknologi Hijau untuk Pengurangan Emisi dalam Industri Otomotif, Ekologi dan Manajemen Lingkungan, dan Manajemen Lingkungan Hidup.



**Dr. Ir. Hendrik Gunadi, M.P.**, lahir di Makassar, pada tanggal 14 Juli 1968. Menyelesaikan S1 Jurusan Agronomi UNHAS tahun 1992, S2 Jurusan Sistem-Sistem Pertanian di Program Pasca Sarjana UNHAS tahun 2003, dan S3 Jurusan Ilmu Pertanian Program Pasca Sarjana UNHAS tahun 2018. Saat ini menjabat sebagai Kepala Biro Inovasi, Hak Kekayaan

Intelektual, dan Publikasi; Ketua Sentra Kekayaan Intelektual dan Kepala Inkubator Bisnis Universitas Kristen Indonesia Paulus. Saat ini juga menjadi anggota Ikatan Auditor Teknologi Indonesia (IATI). Selain menjadi dosen pada Universitas Kristen Indonesia Paulus, juga banyak menggeluti riset-riset terapan sosial humaniora dengan fokus riset spasial dan pemodelan untuk meningkatkan kesejahteraan petani melalui riset dan pengabdian kepada masyarakat yang dananya baik melalui hibah Kemdiktisaintek ataupun secara mandiri.



**Jufri Manga'**, Lahir di Toraja pada tanggal 04 Februari 1977. Menyelesaikan studi S1 pada Jurusan Teknik Sipil di Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar Tahun 2003, S2 pada Program Magister Teknik Sipil pada kampus yang sama Tahun 2019. Penulis saat ini aktif mengajar di Program Studi Teknik Sipil di Universitas Kristen Indonesia Toraja.

# KIMIA LINGKUNGAN

Lingkungan merupakan sistem kompleks yang terdiri dari berbagai komponen fisik, kimia, dan biologis yang saling berinteraksi. Dalam dinamika tersebut, kimia lingkungan menjadi cabang ilmu yang berperan penting dalam memahami proses-proses kimiawi yang terjadi secara alami maupun akibat aktivitas manusia. Ilmu ini mempelajari distribusi, reaksi, dan dampak senyawa kimia di lingkungan, baik di udara, air, tanah, maupun biosfer. Oleh karena itu, pemahaman dasar tentang kimia lingkungan sangat penting sebagai landasan untuk menganalisis permasalahan pencemaran dan mencari solusi berkelanjutan



ARSY MEDIA Anggota IKAPI No. 069/SSL/2024

Workshop: Jl. Toddopuli Raya Timur No.15, Borong, Kec. Manggala,  
Kota Makassar, Sulawesi Selatan

Redaksi : Villa Mutiara Hijau 7 No 26, Kel. Bulurokeng, Kec. Biringkanaya,  
Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan  
Telp. 0853-9900-0031  
<https://arsymedia.com>



Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual  
Kementerian Hukum & Hak Asasi Manusia R.I.

EC002025092940



9 786349 609876