

# **DAMPAK BAHAN KIMIA BERACUN DI PERAIRAN PADA KESEHATAN DAN SISTEM EKOLOGI**

**Panduan Praktis Bagi Mahasiswa, Dosen,  
Peneliti, Praktisi dan Para Profesional**





# **DAMPAK BAHAN KIMIA BERACUN DI PERAIRAN PADA KESEHATAN DAN SISTEM EKOLOGI**

**Panduan Praktis Bagi Mahasiswa, Dosen,  
Peneliti, Praktisi dan Para Profesional**

**Prof. Anwar Mallongi, S.K.M., M.Sc., Ph.D  
Dr. Ratna Dwi Puji Astuti, S.K.M.  
Dr. Annisa Utami Rauf, S.Pd.  
Ernyasih, SKM.,MKM**

**DAMPAK BAHAN KIMIA BERACUN DI PERAIRAN  
PADA KESEHATAN DAN SISTEM EKOLOGI**  
Panduan Praktis Bagi Mahasiswa, Dosen, Peneliti, Praktisi dan Para Profesional

Oleh :

Prof. Anwar Mallongi, S.K.M., M.Sc., Ph.D  
Dr. Ratna Dwi Puji Astuti, S.K.M.  
Dr. Annisa Utami Rauf, S.Pd.  
Ernyasih, SKM.,MKM

© Gosyen Publishing 2023



**Gosyen Publishing**  
Jatirejo 58B RT07/RW21  
Sendangadi, Mlati, Sleman, Yogyakarta, 55285  
[www.gosyenpublishing.web.id](http://www.gosyenpublishing.web.id)  
e-mail : [gosyenpublishingcv@gmail.com](mailto:gosyenpublishingcv@gmail.com)

**Ilustrasi Dalam** : Andy Gp  
**Ilustrasi Sampul** : Tim Gosyen

Cetakan Pertama 2023

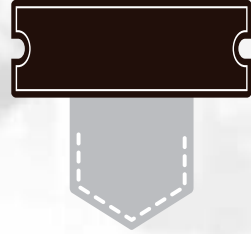
Katalog Dalam Terbitan (KDT):

**DAMPAK BAHAN KIMIA BERACUN DI PERAIRAN  
PADA KESEHATAN DAN SISTEM EKOLOGI**  
Panduan Praktis Bagi Mahasiswa, Dosen, Peneliti, Praktisi dan Para Profesional;  
Anwar Mallongi, Ratna Dwi Puji Astuti, Annisa Utami Rauf, dan Ernyasih,

xiv, 149 hlm; 16 x 23 cm.  
ISBN 978-623-6913-...-.....

Anggota IKAPI DIY  
No. 098/DIY/2017

**Hak Cipta dilindungi Undang-undang.**  
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apa pun,  
termasuk fotokopi, tanpa izin tertulis dari penerbit.



# KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil Alamiin, dengan mengucap syukur kehadirat Allah Yang Maha Kuasa, akhirnya buku Dampak bahan kimia beracun di perairan pada kesehatan dan sistem ekologi ini dapat tersusun. Disadari bahwa dalam buku ini masih terdapat beberapa kelemahan dan kekurangan sehingga masih perlu kesempurnaan karena keterbatasan pengetahuan, wawasan dan referensi yang dimiliki oleh para penulis.

Buku referensi ini dibuat sebagai acuan dalam proses pembelajaran yang berhubungan dengan bahan kimia pencemar di perairan, baik bahan kimia gas maupun logam ataupun berupa larutan. Sebagai konsekwensinya, bahan dapat menimbulkan terjadinya risiko baik pada manusia dan juga pada Lingkungan. Perubahan bahan polutan toksik dan berbahaya dapat masuk di perairan secara langsung dan juga tidak langsung menuju perairan baik permukaan, larut dalam air dan juga menyatu dalam endapan. Keberadaan polutan tersebut penting untuk dinilai dalam menentukan tingkat risiko pada manusia, mahluk biota air dan juga lingkungan perairan dan perlu upaya pengendaliannya, dan didalam buku ini juga diberikan metode penilaian risiko kesehatan dan lingkungan.

Materi dalam buku ini disusun dan dibahas dengan sederhana agar mudah dipahami dan dapat diimplementasikan mulai dari kalangan peneliti, praktisi, akademisi, mahasiswa maupun masyarakat umum. Buku ini terdiri dari 5 Bab dengan masing-masing topik yang telah tersusun secara sistematis. Fokus penekanannya pada bahan kimia yang masuk ke perairan,

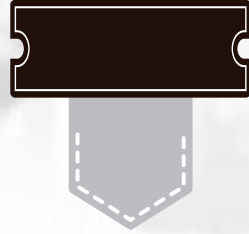
terkait karakteristik, sumber dan jalan masuknya bahan pada manusia dan lingkungan, serta dampaknya yang ditimbulkan.

Diharapkan dengan adanya buku ini akan membantu semua kalangan yang mendalami ilmu kesehatan lingkungan, bahan pencemar kimia dan penilaian risiko kesehatan dan juga risiko ekologi. Pembaca juga akan memahami dampak kesehatan dan lingkungan yang ditimbulkannya lebih terarah, terfokus dan lebih bermanfaat. Akhir kata disampaikan bahwa saran dan kritik dalam rangka perbaikan dan penyempurnaan buku ini sangat diharapkan.

Makassar, 2023

Wassalam,

Penulis



# DAFTAR ISI

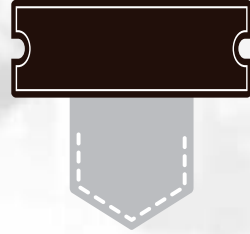
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>v</b>	
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>vii</b>	
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xi</b>	
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xiii</b>	
<b>BAB 1</b>		
<b>PENCEMARAN BAHAN KIMIA DI</b>		
<b>LINGKUNGAN PERAIRAN</b>	<b>1</b>	
1.1	Pendahuluan	1
1.2	Jenis perairan	5
1.3	Dampak dari Kontaminasi Bahan Kimia di	
	Lingkungan Perairan	7
1.3.1	Dampak kesehatan manusia	7
1.3.2	Dampak Ekologis	10
1.4	Indeks Pencemaran di Lingkungan Perairan	11
1.5	Peraturan Terkait Pengendalian Kontaminasi	
	Bahan Kimia di Lingkungan	15
1.6	Simpulan	16
	Daftar Pustaka	16

<b>BAB 2</b>	<b>PENCEMARAN LOGAM BERAT DI KAWASAN PESISIR: KAJIAN MENGENAI NASIB, TRANSPORTASI, DAN TOKSISITAS</b>	<b>25</b>
2.1	Pendahuluan	25
2.2	Jenis dan Sumber Logam Berat	29
2.3	Nasib logam berat di lingkungan	37
2.4	Efek Dari Paparan Logam Berat	40
2.5	Simpulan	48
	Daftar Pustaka	48
<b>BAB 3</b>	<b>POLYCHLORINATED BIPHENYL (PCB) DALAM LINGKUNGAN AKUATIK</b>	<b>65</b>
3.1	Pendahuluan	65
3.2	Karakteristik Fisik dan Kimia PCB	67
3.3	Nasib PCB di Lingkungan Perairan	68
3.4	Dampak dari kontaminasi PCB pada perairan	71
3.4.1	Dampak Ekologis	71
3.4.2	Dampak Kesehatan Manusia	72
3.5	Toksikokinetik dan Toksikodinamik PCB	76
3.5.1	Mekanisme Toksisitas PCB	80
3.6	Simpulan	81
	Daftar Pustaka	83
<b>BAB 4</b>	<b>LIMBAH CAIR INDUSTRI MAKANAN DAN DAMPAK</b>	<b>101</b>
4.1	Latar Belakang	101
4.2	Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Meningkatnya Jumlah Limbah Cair Industri Makanan Pada Lingkungan	102
4.3	Karakteristik Limbah Cair Industri Makanan	104
4.4	Dampak Pencemaran Limbah Cair Industri Makanan	105



4.5	Penanganan Limbah Cair Industri Makanan	109
4.6	Kesimpulan	121
	Daftar Pustaka	122
<b>BAB 5</b>	<b>LIMBAH BAHAN BERACUN BERBAHAYA DAN DAMPAK KESEHATAN LINGKUNGAN</b>	<b>125</b>
5.1	Latar Belakang	125
5.2	Pengertian Limbah B3	126
5.3	Karakteristik limbah B3	130
5.4	Sumber Limbah Bahan berbahaya dan Beracun (B3)	132
5.5	Bahan bahan yang mengandung B3 dalam rumah tangga	133
5.6	Gejala Umum Pencemaran Lingkungan Akibat Limbah Industri	136
5.7	Dampak Pencemaran Limbah Bahan berbahaya dan Beracun (B3) Industri	137
5.8	Upaya Pencegahan Pencemaran Limbah (B3) Industri	141
5.9	Kesimpulan	142
	Daftar Pustaka	142
	<b>PROFIL PENULIS</b>	<b>145</b>

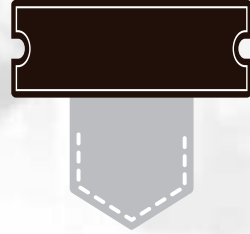




# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b>	Jenis organisme yang hidup dalam ekosistem perairan (IGNOU 2018)	7
<b>Gambar 1.2</b>	Akumulasi Pb pada beberapa organ utama dalam tubuh manusia (Collin et al. 2022).	9
<b>Gambar 1.3</b>	Mekanisme toksisitas arsenik dalam tubuh manusia (Fatoki and Badmus 2022)	10
<b>Gambar 2.1</b>	Masalah terkait yang terjadi di kawasan pesisir (Kay and Alder, 1999)	28
<b>Gambar 2.2</b>	Keterkaitan kualitas air dengan kegunaan air di perairan pesisir (Scialabba, 1998)	29
<b>Gambar 2.3</b>	Sumber antropogenik logam berat di kawasan pesisir	36
<b>Gambar 2.4</b>	Transportasi logam berat ke lingkungan perairan (Selvi et al., 2019)	39
<b>Gambar 2.5</b>	Distribusi logam berat pada sedimen dari sungai ke lautan lepas (Ip et al., 2007)	39
<b>Gambar 2.6</b>	Proses transformasi arsen (As) dalam lingkungan perairan (Raab and Feldmann, 2003)	40
<b>Gambar 2.6</b>	Mekanisme toksistas logam berat dalam tubuh manusia	45
<b>Gambar 3.1</b>	Struktur kimia Polychlorinated Biphenyl (PCB)	67
<b>Gambar 3.2</b>	Transportasi PCB dalam ekosistem akuatik (Anh et al., 2021)	70

<b>Gambar 3.3</b>	Model Physiologically Based Pharmacokinetic (PBPK) untuk PCB Adaptasi dari Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000	82
<b>Gambar 3.4</b>	Mekanisme Toksisitas PCB pada Tubuh	83



# DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.2</b>	Bahan kimia berbahaya, zat toksik dan dampak kesehatannya (Adeola 2021)	4
<b>Tabel 1.2</b>	Klasifikasi Intensitas Polusi dengan menggunakan indeks geoakumulasi ( $I_{geo}$ )	11
<b>Tabel 1.3</b>	Klasifikasi tingkat kontaminasi bahan kimia dengan menggunakan IFK dan IBP	13
<b>Tabel 1.4</b>	Klasifikasi nilai potensi risiko ekologis	14
<b>Tabel 1.5</b>	Peraturan yang mengatur tentang baku mutu cemaran bahan kimia dalam perairan	15
<b>Tabel 2.1</b>	Daftar prioritas logam berat berdasarkan U.S Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).	31
<b>Tabel 2.2</b>	Faktor pengayaan antropogenik (FPA) untuk total emisi logam berat secara global pada tahun 1980an (seluruh nilai dinyatakan dalam $10^6$ kg/tahun)	36
<b>Tabel 2.3</b>	Kontribusi input sungai, pelarutan logam berat di sungai dan input atmosfer ke lautan	37
<b>Tabel 2.4</b>	Konsentrasi latar belakang beberapa logam berat di air laut (Forstner and Wittmann, 1983)	38
<b>Tabel 2.5</b>	Efek Pajanan logam berat pada kesehatan manusia	45



# PENCEMARAN BAHAN KIMIA DI LINGKUNGAN PERAIRAN

## 1.1 Pendahuluan

Menurut kamus besar Bahasa Indonesia, pencemaran adalah perbuatan mencemari atau mencemarkan; pengotoran. Oleh sebab itu, pencemaran lingkungan sendiri dapat didefinisikan sebagai pengotoran lingkungan sebagai akibat dari masuknya zat asing dalam jumlah yang besar. Masuknya bahan kimia tersebut dapat dipicu dari adanya aktivitas geogenik sebagai sumber alamiah dan aktivitas antropogenik sebagai sumber buatan yang berasal dari sisa/limbah kegiatan manusia. Dewasa ini ada dua istilah yang mendefinisikan masuknya zat asing ke lingkungan dalam ilmu lingkungan yaitu 1) polusi, dan 2) kontaminasi. Kontaminasi didefinisikan sebagai keberadaan zat dimana zat tersebut seharusnya tidak berada dalam lingkungan tersebut atau zat tersebut berada diatas batas konsentrasi latar belakang atau konsentrasi alamiahnya. Sedangkan polusi adalah kontaminasi yang mengakibatkan atau dapat mengakibatkan efek biologis yang merugikan pada penduduk (Chapman 2007). Oleh sebab itu, seluruh polutan dapat dinyatakan sebagai kontaminan, tetapi tidak semua kontaminan adalah polutan.

Pengukuran berbasis efek seperti pengukuran di laboratorium, atau pengujian toksisitas di lapangan serta mengukur status kesehatan penduduk

yang terpajan suatu zat menjadi informasi kunci untuk menentukan apakah keberadaan suatu zat dapat dinyatakan sebagai polusi atau kontaminasi. Pengukuran zat di laboratorium dapat bersifat prediktif, namun kurang realistic. Sebaliknya pengukuran toksisitas di lapangan atau pada manusia bersifat realistis, namun perlu pembuktian di laboratorium. Oleh sebab itu, dalam penentuannya kedua metode diperlukan.

Air merupakan unsur yang penting dalam kehidupan manusia selain udara (Astuti and Mallongi 2020). Menurut *World Water Development Report* dari UNESCO, penggunaan air tawar secara global telah meningkat enam kali sejak 100 tahun terakhir dan terus mengalami peningkatan sekitar 1% setiap tahunnya sejak tahun 1980an (Lin et al. 2022). Peningkatan konsumsi air tersebut disertai dengan adanya peningkatan jumlah penduduk yang mengakibatkan meningkatnya kegiatan produksi seperti industry, pertanian, dan limbah dari kegiatan perkotaan mengakibatkan terjadinya dua masalah utama dalam pengelolaan air yaitu masalah terkait kuantitas dan kualitas air. Kualitas air yang buruk dapat mengakibatkan berbagai macam penyakit baik yang bersifat akut maupun kronis. Selain mikroorganisme, bahan-bahan kimia baik anorganik dan organik merupakan kontaminan utama di perairan yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia dan organisme di perairan. Kontaminasi bahan kimia di lingkungan perairan dapat dipengaruhi oleh kontaminasi yang berasal dari daratan begitu pula sebaliknya melalui berbagai mekanisme seperti presipitasi, air limpasan, rembesan, kebocoran pipa limbah, dan intrusi air laut. Adapun jenis kontaminan kimia yang berpotensi masuk ke lingkungan diantaranya logam berat (Nuraini et al. 2017; Mallongi et al. 2020a, b, 2021; Astuti et al. 2021a, b, c, 2022; Rauf et al. 2022), volatile organic chemical (VOC) (Schwarzenbach and Westall 1981; Juang et al. 2009; Zheng et al. 2020; Stockwell et al. 2021), persistent organic chemical (POPs) (Stoker and Seager 1977; Bu et al. 2015; Nguyen et al. 2017; Habibullah-Al-Mamun et al. 2019; Longo et al. 2021; USEPA 2022), dan plastik (Firdaus et al. 2020; Lestari et al. 2021; Issac and Kandasubramanian 2021; Basri K et al. 2021; Kirstein et al. 2021; Laermanns et al. 2021).



Bahan kimia dan zat beracun dapat ditemui dimanapun dalam kehidupan manusia di seluruh dunia baik di udara, air, tanah, tempat kerja dan rumah tangga. Kontaminasinya dalam jumlah yang sangat besar menjadi satu perhatian bagi peneliti dan pembuat kebijakan di seluruh dunia karena jenis kontaminan ini berpotensi untuk menimbulkan dampak buruk pada sistem ekologis dan kesehatan manusia di kemudian hari. Berdasarkan data dari *United Nation* dan *World Health Organization (WHO)*, diperkirakan ada hampir 25 juta orang keracunan pestisida dan setidaknya 200 ribu orang mati setiap tahunnya karena kasus keracunan pestisida (Adeola 2021). Akumulasi polutan beracun dan dampaknya pada kesehatan merupakan masalah yang paling mendesak selama tiga dekade terakhir. Masalah ini juga termasuk dalam isu kesehatan global saat ini. Pada bab ini akan fokus pada dampak kontaminasi zat kimia dan beracun pada kesehatan manusia dan organisme akuatik, cara atau indeks yang digunakan untuk menentukan kualitas perairan, dan peraturan yang mengatur konsentrasi zat kimia dan beracun di perairan.

Bahan kimia dan bahan beracun memiliki perbedaan definisi menurut Goldman (2002), dimana bahan kimia didefinisikan sebagai zat yang diproduksi, diproses, dan dikomersialkan, selain yang dipasarkan sebagai pestisida, herbisida, obat-obatan, atau bahan tambahan makanan. Bahan kimia mencakup berbagai zat termasuk asam, alkali, gas, logam, senyawa organik, dan anorganik (Tabel 1). Sedangkan zat toksik didalamnya termasuk pestisida karena zat tersebut diproduksi dan dipasarkan karena toksisitasnya dan kemampuannya untuk membunuh serangga dan tanaman yang tidak diharapkan pada lahan pertanian.

Bahan kimia juga dapat diklasifikasikan menjadi lima (5) kategori diantaranya (Adeola 2021) 1) bahan kimia anorganik dan organik dasar yang merupakan bahan baku untuk berbagai produk, 2) bahan kimia khusus didalamnya termasuk per- dan polyfluorinated chemical, flame retardants, dan nanomaterial, 3) kimia pertanian termasuk pupuk dan pestisida, 4) kimia farmasi yang digunakan untuk membuat obat-obatan, 5) produk

konsumen berkisar pada produk rumah tangga, plastik, produk pembersih, elektronik, dan kosmetik.

**Tabel 1.2** Bahan kimia berbahaya, zat toksik dan dampak kesehatannya  
(Adeola 2021)

<b>Nama bahan/ zat kimia</b>	<b>Efeknya terhadap kesehatan atau gejala kesehatan yang mungkin timbul akibat pajanan</b>
<b>Asam</b>	
Asam hidroklorida	Risiko pernafasan, berbahaya pada mata dan kulit
Asam florida	Merusak jaringan, mengakibatkan iritasi pada membrane mukosa
Asam nitrat	Risiko pernafasan, berbahaya pada mata dan kulit
Asam sulfat	Risiko pernafasan, berbahaya pada mata dan kulit
<b>Alkali</b>	
Sodium hidroksida	Korosif pada kulit, mata dan saluran pernafasan
Potassium hidroksida	Menyebabkan iritasi dan korosif pada kulit, daging, mata dan saluran pernafasan
Potassium karbonat	Menyebabkan iritasi dan korosif pada kulit, daging, mata dan saluran pernafasan
<b>Aldehid</b>	
Acetaldehid	Iritasi membran mukosa
Metaldehid	Iritasi membran mukosa
Benzaldehid	Iritasi membran mukosa
Keton	Iritasi mata dan saluran pernafasan, dermatitis
<b>Gas</b>	
Amonia	Iritasi pad mata, hidung, tenggorokan dan kulit
Klorin	Menyebabkan iritasi, menyebabkan penurunan fungsi paru-paru
Formaldehid	Menyebabkan iritasi saluran pernafasan, kulit, dan menyebabkan alergi, diperkirakan dapat menyebabkan kanker
Hidrogen sianida	Sangat beracun, mempengaruhi enzim tubuh dan menurunkan ketersediaan oksigen

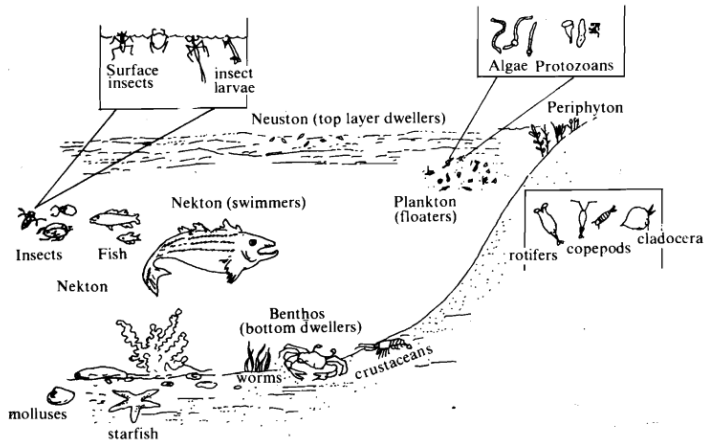
<b>Nama bahan/ zat kimia</b>	<b>Efeknya terhadap kesehatan atau gejala kesehatan yang mungkin timbul akibat pajanan</b>
Hidrogen sulfida	Mual, muntah, iritasi pada saluran pernafasan dan mata, berpotensi untuk menyebabkan kerusakan saraf
Karbonil nikel	Iritasi pada saluran pernafasan, sakit kepala, sakit dada, lunglai, sianosis, dan berpotensi karsinogenik
Nitrogen dioksida	Iritasi pada saluran pernafasan atas, bronkitis kronik,
Sulfur dioksida	Menyebabkan iritasi pada mata, hidung dan tenggorokan
<b>Kimia anorganik</b>	
Karbon disulfida	Menyebabkan kerusakan pada sistem saraf pusat dan kelainan pada saluran pernafasan
Logam berat	
Arsenik	Sangat beracun, dapat menyebabkan kanker (kandung kemih, ginjal, kulit, hati, dan paru-paru), gangguan ginjal, hati dan saraf serta penyakit kulit
Asbestos	Mesothelioma, kanker (kolon, paru-paru, ginjal, lambung)
Merkuri	Kerusakan pada sistem saraf
<b>Zat beracun lainnya</b>	
Toluene	Asma, dermatitis
Fenol	Dermatitis

## 1.2 Jenis perairan

Ekosistem perairan dapat dibagi menjadi dua yaitu (IGNOU 2018) : 1) ekosistem perairan tawar atau *freshwater ecosystems* seperti danau, kolam, rawa, sungai, air sumur 2) ekosistem perairan laut atau *marine ecosystems* seperti laut, dan lautan lepas, 3) ekosistem perairan payau atau *brackish water ecosystems* seperti pesisir, rawa dan hutan mangrove, dan rawa garam. Pembagian klasifikasi ekosistem tersebut didasarkan pada tingkat salinitas dari perairan. Ekosistem perairan tawar memiliki tingkat salinitas yang sangat rendah atau kurang dari 5 ppt (parts per thousands). Ekosistem perairan laut memiliki tingkat salinitas sama atau sama dengan 35 ppt, sedangkan ekosistem perairan payau memiliki tingkat salinitas antara 5 sampai 35 ppt. Masing-masing ekosistem memiliki perbedaan organisme

yang hidup di dalamnya. Organisme perairan dibagi menjadi lima yaitu (Gambar 1):

- a. Neuston adalah organisme yang mengapung di permukaan perairan (batas antara air dan udara). Organisme ini tidak melekat pada substrat tertentu dalam permukaan air dan bisa berupa hewan atau tumbuhan. Contoh dari neuston adalah teratai, ganggang, enceng gondok, laba-laba air, protozoa, bakteri, dan senrangga air.
- b. Perifiton adalah organisme yang hidup melekat pada permukaan substrat yang ada di air seperti batang tumbuhan air, daun, kayu dan lain sebagainya (Siregar et al. 2015). Yang termasuk dalam jenis perifiton biasanya *Bacillariophyceae*, *Cyanophyceae*, *Chlorophyceae*, *Dynophyceae*, dan *Xanthophyceae*.
- c. Plankton adalah sekelompok hewan dan tumbuhan mikroskopik (phytoplankton dan zooplankton) yang ditemukan di ekosistem perairan.
- d. Nekton adalah organisme akuatik yang memiliki kemampuan untuk berenang dan memiliki pergerakan yang tidak terbatas di perairan. Contoh ikan, singa laut, paus dll
- e. Benthos atau organisme benthic adalah organisme yang ditemukan atau hidup di bawah atau dasar perairan biasanya berdekatan dengan sedimen, pasir atau lumpur. Pergerakan dari organisme benthik biasanya lebih terbatas contohnya kerang, tiram, dan siput laut.



**Gambar 1.1** Jenis organisme yang hidup dalam ekosistem perairan (IGNOU 2018)

Ekosistem perairan tawar dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu:

1. Ekosistem perairan lentik – ekosistem ini dicirikan sebagai ekosistem yang tidak memiliki arus air atau air hanya menggenang (Dimenta et al. 2020). Contohnya danau, kolam, rawa, dan bendungan.
2. Ekosistem perairan lotik – ekosistem ini dicirikan sebagai ekosistem yang memiliki arus air. Contohnya sungai, mata air. Organisme yang hidup di ekosistem perairan lotik lebih heterogen dibandingkan dengan organisme pada ekosistem perairan lentik (IGNOU 2018).

### 1.3 Dampak dari Kontaminasi Bahan Kimia di Lingkungan Perairan

#### 1.3.1 Dampak kesehatan manusia

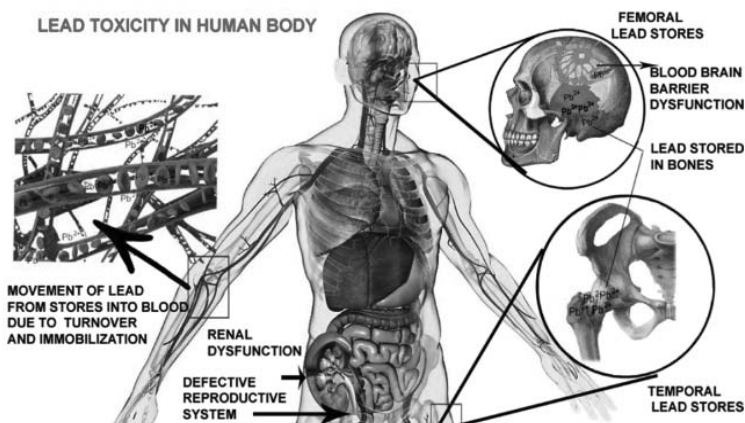
Zat kimia dapat berinteraksi dengan organisme hidup dengan berbagai cara. Jika mempertimbangkan dua bahan kimia, kedua zat kimia dapat saling berinteraksi pada tempat yang sama yaitu interaksi reseptor dan enzim. Interaksi dapat bersifat aditif jika keduanya mengaktifkan target yang sama, serta bersifat oklusif apabila salah satunya mengaktifkan target

dan satu zat lainnya mengikat tanpa mengaktifkan target. Selain interaksi tersebut lebih banyak lagi interaksi zat kimia dalam tubuh organisme yang akan mempengaruhi kombinasi perubahan ekspresi gen, perubahan tingkat konsentrasi ion intraseluler, perubahan metabolisme seluler atau produksi regulator seluler (Carpenter et al. 2002). Dalam kenyataannya, beberapa zat kimia hanya memiliki satu sel target dan kebanyakan zat kimia dapat menyerang beberapa target dalam satu sel yang sama. Hasil interaksi tersebut adalah penyakit pada bagian tubuh tertentu yang diserang misalnya masuknya Hg dan Pb ke tubuh akan lebih menyerang sistem saraf sebagai targetnya, sedangkan pajanan Cd akan lebih menyerang hati sebagai targetnya. Pada Gambar 2 digambarkan target utama dari akumulasi logam berat (Pb) dalam tubuh manusia. Mekanisme toksisitas dan target sel yang diserang akan menentukan penyakit apa yang dapat ditimbulkan dari pajanan zat kimia, Gambar 3 merupakan contoh dari mekanisme dan target serta *outcome* dari pajanan arsenik pada manusia.

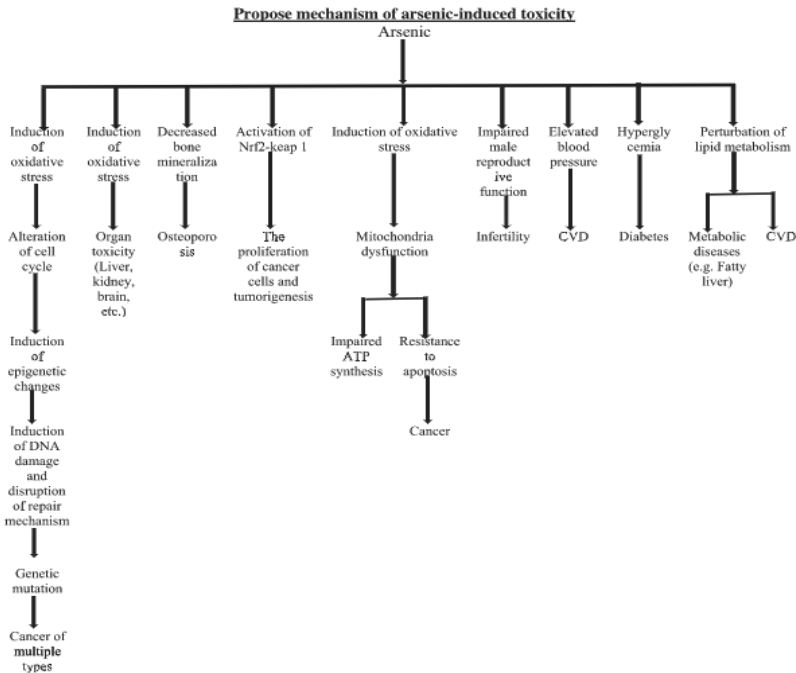
Efek toksik dari masing-masing zat kimia akan berbeda pada berbagai organ. Sebagai contoh bentuk toksik dari logam berat Cd adalah bentuk ionnya ( $Cd^{2+}$ ) (Johri et al. 2010). Terbentuknya ion tersebut berperan dalam perubahan aktivitas mitokondria (pecahnya membrane sel dan gangguan respirasi sel), pembentukan stress oksidatif dan apoptosis, serta gangguan interaksi dengan saluran ion dan transporter lain (Barbier et al. 2005; Thévenod 2009, 2010; Johri et al. 2010; Thévenod and Lee 2013b, a). Ion Cd juga akan berkompetisi dengan ion logam lain (Zn dan Ca) sehingga dapat mengganggu homeostasis seluler (Yang and Shu 2015). Mekanisme toksik utama dari logam Cd diperantarai oleh kematian sel akibat produksi berlebihan stress oksidatif (Kukongviriyapan et al. 2016).

Mekanisme toksisitas PCB tergantung pada strukturnya dimana PCB koplanar atau PCB mirip doksins akan mengaktifkan jalur metabolisme AhR yang mengaktifkan respon inflamasi dan produksi stres oksidatif pada tubuh, sedangkan PCB non-koplanar akan mengaktifkan jalur metabolisme pregnane xenobiotic receptor (PXR) dan constitutive androstane receptor (CAR) yang berefek pada proses metabolik seperti NAFLD/NASH, gangguan

metabolisme energi, dan obesitas, dan kerusakan neutrofil (Berntsen et al. 2016; Gupta et al. 2017). Mekanisme dari AhR menghasilkan ekspresi gen yang berkaitan dengan karsinogenesis melalui deregulasi beberapa siklus sel dan jalur transduksi sinyal(Callahan et al. 2017). Mekanisme toksisitas lainnya yang diinduksi oleh PCB meliputi perubahan microRNA, gangguan dengan pensinyalan faktor pertumbuhan epidermal (EGFR), DNA metilasi, efek genotoksik, supresi imun, respons inflamasi, gangguan endokrin (Callahan et al. 2017; Gupta et al. 2017; Kobayashi et al. 2017; Mullerova et al. 2017).s



**Gambar 1.2** Akumulasi Pb pada beberapa organ utama dalam tubuh manusia (Collin et al. 2022).



**Gambar 1.3** Mekanisme toksisitas arsenik dalam tubuh manusia (Fatoki and Badmus 2022)

### 1.3.2 Dampak Ekologis

Dampak dari kontaminasi bahan kimia dan zat beracun ke perairan bukan hanya akan mengakibatkan dampak yang merugikan pada kesehatan manusia tetapi juga pada organisme hidup di perairan. Diketahui bahwa kontaminasi zat toksik dari residu pestisida (carbaryl, diuron, dan klorpirifos) dapat mengakibatkan kematian pada *Daphnia magna* dan ikan pada konsentrasi yang rendah yaitu 0.001 dan 0.08  $\mu\text{mol/L}$  (Yasser et al. 2015). Beberapa penelitian menyatakan bahwa akumulasi logam berat dalam sedimen dapat secara langsung mengganggu ekosistem perairan normal dengan memengaruhi organisme bentik dan juga memengaruhi organisme lain melalui jaring makanan (Krasnić et al. 2013; Zhang et al. 2020; Pandiyan et al. 2021). Fe merupakan unsur esensial, namun akumulasi  $\text{Fe}^{2+}$  yang berlebihan di hati dapat mengganggu proses sintesis hemoglobin



dan sel darah pada ikan (Mehmood et al. 2019). paparan Fe yang berlebihan dapat berdampak pada hewan air dan habitatnya dengan mengganggu metabolisme dan osmoregulasi serta mengubah kualitas dan struktur habitat benthik dan sumber makanan (Gurzau et al. 2003).

### 1.4 Indeks Pencemaran di Lingkungan Perairan

Terdapat beberapa indeks yang dapat digunakan untuk menentukan kualitas dan pencemaran di ekosistem perairan diantaranya (Kowalska et al. 2018):

a. Indeks geoakumulasi

Indeks geoakumulasi dilakukan untuk menentukan pencemaran akibat satu logam berat tertentu yang terkandung di dalam sedimen atau tanah (Müller 1969). Rumus yang digunakan untuk menentukan indeks geoakumulasi sebagai berikut:

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_n}{1.5 \times C_b} \right]$$

$C_n$  adalah konsentrasi dari logam berat;  $C_b$  adalah konsentrasi logam belakang; 1.5 adalah konstanta yang digunakan untuk menentukan kemungkinan variasi logam berat sebagai hasil dari proses alamiah. Hasil dari indeks geoakumulasi dapat diklasifikasikan menjadi 7 kelas utama (Tabel 2).

**Tabel 1.2** Klasifikasi Intensitas Polusi dengan menggunakan indeks geoakumulasi ( $I_{geo}$ )

$I_{geo}$	Intensitas polusi
>5	Tercemar sangat berat
4 – 5	Tercemar berat hingga sangat berat
3 – 4	Tercemar berat
2 – 3	Tercemar sedang hingga berat

1 – 2	Tercemar sedang
< 1	Tidak tercemar hingga tercemar sedang
≤ 0	Tidak tercemar

---

b. Faktor pengayaan (FP)

Faktor pengayaan (FP) atau *enrichment factor* adalah indeks yang digunakan untuk menentukan dampak dari kegiatan antropogenik terhadap pengayaan bahan kimia di lingkungan (Kowalska et al. 2018; Shirani et al. 2020). Unsur yang biasanya digunakan sebagai unsur latar belakang dalam perhitungan FP diantaranya Fe, Ca, Al, Ti, Sc, dan Mn. Indeks ini digunakan untuk menilai kontribusi kegiatan antropogenik terhadap pengayaan satu bahan kimia dalam lingkungan. Indeks FP dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$EF = \frac{\left[\frac{C_n}{C_b}\right]_{\text{sampel}}}{\left[\frac{C_n}{C_b}\right]_{\text{latar belakang}}}$$

Jika nilai FP berkisar antara 0.5 – 1.5 maka konsentrasi bahan kimia dalam kompartemen lingkungan berasal dari proses alamiah. Jika nilai FP melebihi nilai 1.5 maka kontaminasi bahan kimia dalam kompartemen lingkungan tersebut berasal dari sumber antropogenik (Kowalska et al. 2018).

c. Indeks faktor kontaminasi (IFK)

Indeks faktor kontaminasi digunakan untuk menentukan tingkat kontaminasi logam berat pada suatu kompartemen lingkungan. Rumus yang digunakan untuk menghitung faktor kontaminasi (Hakanson 1980; Kowalska et al. 2018):

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

Hasil dari perhitungan faktor kontaminasi dapat dikalsifikasikan sebagai berikut (Tabel 3).

**Tabel 1.3** Klasifikasi tingkat kontaminasi bahan kimia dengan menggunakan IFK dan IBP

Nilai IFK	Klasifikasi kontaminasi	Nilai IBP	Klasifikasi kontaminasi
<1	Terkontaminasi Rendah	<0	Tidak terkontaminasi
1 – 3	Terkontaminasi Sedang	0 – 2	Tidak terkontaminasi sampai tercemar ringan
3 – 6	Terkontaminasi berat	2 – 4	Terkontaminasi sedang
>6	Terkontaminasi sangat berat	4 – 6	Terkontaminasi tinggi
		6 – 8	Terkontaminasi sangat tinggi
		8 – 10	Terkontaminasi luar biasa tinggi

*Sumber: (Hakanson 1980; Ahmad 2013; Shen et al. 2019)*

d. Indeks beban pencemaran (IBP)

Indeks beban pencemaran (IBP) adalah indeks yang digunakan untuk mengevaluasi derajat pencemaran dari beberapa logam berat yang terdapat di tanah atau sedimen dimana logam berat tersebut berpotensi untuk menimbulkan dampak pada organisme hidup. IBP juga bermanfaat untuk memudahkan memotret penurunan kondisi tanah akibat kontaminasi logam berat. IBP dapat dikalkulasi dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Kowalska et al. 2018):

$$IBP = \sqrt[n]{IFK_1 \times IFk_2 \times IFK_3 \times \dots \times IFK_n}$$

IFK adalah indeks faktor kontaminasi untuk logam berat tunggal. Klasifikasi nilai IBP dirangkum dalam Tabel 3.

e. Indeks risiko ekologis (IRE)

Indeks risiko ekologis adalah indeks yang digunakan untuk menilai derajat risiko ekologis yang mungkin ditimbulkan dari kontaminasi gabungan bahan kimia di air, udara, dan tanah (Kowalska et al. 2018). Indeks ini diperkenalkan oleh Hakanson (1980) untuk menentukan potensi risiko ekologis dari ekosistem perairan. Persamaannya sebagai berikut:

$$IRE = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

Dimana  $n$  adalah jumlah bahan kimia yang diteliti misalnya logam berat Hg dan Pb maka  $n$  adalah 2;  $E_r$  adalah indeks risiko ekologis untuk satu bahan kimia tertentu yang ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E_r^i = T_r^i \times IFK_i$$

$T_r^i$  adalah faktor respon toksik untuk bahan kimia tertentu misalnya Cr = 2; Mn = Zn = 1; Co = Ni = Cu = Pb = 5 (Shen et al. 2019), dan IFK adalah indeks faktor kontaminasi, sedangkan  $E_r^i$  adalah indeks yang menyatakan risiko ekologis untuk satu bahan kimia yang mengontaminasi lingkungan. Klasifikasi risiko ekologis dapat dinyatakan sebagai berikut (Tabel 4):

**Tabel 1.4** Klasifikasi nilai potensi risiko ekologis

Nilai $E_r^i$	Klasifikasi risiko	Nilai IRE	Klasifikasi risiko
<40	Potensi risiko ekologis rendah	<150	Potensi risiko ekologis rendah
40 – 80	Potensi risiko ekologis sedang	150 – 300	Potensi risiko ekologis sedang
80 – 160	Potensi risiko ekologis cukup tinggi	300 – 600	Potensi risiko ekologis cukup tinggi

Nilai $E_r^i$	Klasifikasi risiko	Nilai IRE	Klasifikasi risiko
160 – 320	Potensi risiko ekologis tinggi		
$\geq 320$	Potensi risiko ekologis sangat tinggi	$\geq 600$	Potensi risiko ekologis sangat tinggi

Sumber: (Hakanson 1980)

## 1.5 Peraturan Terkait Pengendalian Kontaminasi Bahan Kimia di Lingkungan

Terdapat beberapa peraturan yang dijadikan saduran untuk menentukan standar atau baku muku perairan diantaranya (Tabel 5):

**Tabel 1.5** Peraturan yang mengatur tentang baku mutu cemaran bahan kimia dalam perairan

PP No 22 Tahun 2021	Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
PERMENLHK No 6 Tahun 2021	Tata cara dan persyaratan pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun
PERMENLHK No 12 Tahun 2020	Penyimpanan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun
PERMENKES No 32 Tahun 2017	Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, dan Pemandian Umum
KEPMENLH No 51 Tahun 2004	Baku mutu air laut
Peraturan BPOM No 5 Tahun 2018	Batas maksimum cemaran logam berat dalam pangan olahan
SNI No 7387:2009	Batas maksimum cemaran logam berat dalam pangan

## 1.6 Simpulan

Akumulasi bahan kimia dan zat toksik pada lingkungan perairan berpotensi untuk menimbulkan dampak yang merugikan pada sistem ekologis dan kesehatan manusia. Mekanisme dari masing-masing bahan kimia untuk menimbulkan suatu efek berbeda-beda tergantung dari spesiasi dan target selnya. Beberapa indeks dapat digunakan untuk menentukan kualitas perairan yang terkontaminasi oleh bahan kimia yang nantinya dapat dijadikan saduran dalam pembuatan kebijakan lingkungan yang berkelanjutan.

## Daftar Pustaka

- Adeola FO (2021) Global Impact of Chemicals and Toxic Substances on Human Health and the Environment. In: Haring R (ed) Handbook of Global Health. Springer International Publishing, Cham, pp 2227–2256
- Ahmad F (2013) Distribusi dan prediksi tingkat pencemaran logam berat (Pb, Cd, Cu, Zn, dan Ni) dalam sedimen di perairan pulau Bangka menggunakan indeks beban pencemaran dan indeks geoakumulasi. *J Ilmu dan Teknol Kelaut Trop* 5:170–181
- Astuti RDP, Mallongi A (2020) Using System Dynamic Modeling for Improving Water Security in the Coastal Area: A Literature Review. *Open Access Maced J Med Sci* 8:143–154. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2020.4395>
- Astuti RDP, Mallongi A, Amiruddin R, et al (2021a) Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. *Gac Sanit* 35:S33–S37. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.12.010>
- Astuti RDP, Mallongi A, Choi K, et al (2022) Health risks from multiroute exposure of potentially toxic elements in a coastal community:

- A probabilistic risk approach in Pangkep Regency, Indonesia. *Geomatics, Nat Hazards Risk* 13:. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2041110>
- Astuti RDP, Mallongi A, Rauf AU (2021b) Risk identification of Hg and Pb in soil: a case study from Pangkep Regency, Indonesia. *Soil Sci Annu* 72:1–15. <https://doi.org/10.37501/soilsa/135394>
- Astuti RDP, Mallongi A, Rauf AU (2021c) Natural enrichment of chromium and nickel in the soil surrounds the karst watershed. *Glob J Environ Sci Manag* 7:1–18. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2021.524891.3622>
- Barbier O, Jacquillet G, Tauc M, et al (2005) Effect of Heavy Metals on, and Handling by, the Kidney. *Nephron Physiol* 99:p105–p110. <https://doi.org/10.1159/000083981>
- Basri K S, Daud A, Astuti RDP, K B (2021) Detection of Exposure to Microplastics in Humans: A Systematic Review. *Open Access Maced J Med Sci* 9:275–280. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2021.6494>
- Berntsen HF, Fonnum F, Walaas SI, Bogen IL (2016) Low-Chlorinated Non-Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls Present in Blood and Breast Milk Induce Higher Levels of Reactive Oxygen Species in Neutrophil Granulocytes than High-Chlorinated Congeners. <https://doi.org/10.1111/bcpt.12620>
- Bu Q, Macleod M, Wong F, et al (2015) Historical intake and elimination of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides by the Australian population reconstructed from biomonitoring data. *Environ Int* 74:82–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.014>
- Callahan CL, Pavuk M, Birnbaum LS, et al (2017) Serum Polychlorinated Biphenyls and Leukocyte Telomere Length in a Highly-Exposed Population: The Anniston Community Health Survey. *Environ Int* 108:212–220. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.018>. Serum

- Carpenter DO, Arcaro K, Spink DC (2002) Understanding the human health effects of chemical mixtures. *Environ Health Perspect* 110:25–42. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110s125>
- Chapman PM (2007) Determining when contamination is pollution – Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environ Int* 33:492–501. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.09.001>
- Collin MS, Venkatraman SK, Vijayakumar N, et al (2022) Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *J Hazard Mater Adv* 7:100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Dimenta RH, Agustina R, Machrizal R, Khairul (2020) Kualitas Sungai Bilah Berdasarkan Biodiversitas Fitoplankton Kabupaten Labuhanbatu, Sumatera Utara. *Ilmu Alam dan Lingkungan* 11:24–33
- Fatoki JO, Badmus JA (2022) Arsenic as an environmental and human health antagonist: A review of its toxicity and disease initiation. *J Hazard Mater Adv* 5:100052. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100052>
- Firdaus M, Trihadiningrum Y, Lestari P (2020) Microplastic pollution in the sediment of Jagir Estuary, Surabaya City, Indonesia. *Mar Pollut Bull* 150:110790. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110790>
- Goldman LR (2002) Toxic chemicals and pesticides: chapter 17. In: JC D (ed) *Stumbling toward sustainability*. Washington D.C, pp 403–432
- Gupta P, Thompson BL, Wahlang B, et al (2017) The environmental pollutant , polychlorinated biphenyls , and cardiovascular disease : a potential target for antioxidant nanotherapeutics. *Drug Deliv Transl Res*. <https://doi.org/10.1007/s13346-017-0429-9>
- Gurzau ES, Neagu C, Gurzau AE (2003) Essential metals - Case study on iron. *Ecotoxicol Environ Saf* 56:190–200. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00062-9](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00062-9)
- Habibullah-Al-Mamun M, Kawser Ahmed M, Saiful Islam M, et al (2019) Occurrence, distribution and possible sources of polychlorinated



- biphenyls (PCBs) in the surface water from the Bay of Bengal coast of Bangladesh. *Ecotoxicol Environ Saf* 167:450–458. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.052>
- Hakanson L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Res* 14:975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- IGNOU (2018) Unit 8 - Types of Ecosystems: Aquatic Ecosystems. Indira Gandhi National Open University (IGNOU)
- Issac MN, Kandasubramanian B (2021) Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environ Sci Pollut Res* 28:19544–19562. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13184-2>
- Johri N, Jacquillet G, Unwin R (2010) Heavy metal poisoning: The effects of cadmium on the kidney. *BioMetals* 23:783–792. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9328-y>
- Juang DF, Lee CH, Hsueh SC (2009) Chlorinated volatile organic compounds found near the water surface of heavily polluted rivers. *Int J Environ Sci Technol* 6:545–556. <https://doi.org/10.1007/BF03326094>
- Kirstein I V., Gomiero A, Vollertsen J (2021) Microplastic pollution in drinking water. *Curr Opin Toxicol* 28:70–75. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.09.003>
- Kobayashi S, Sata F, Miyashita C, et al (2017) Gender-specific association of exposure to non-dioxin-like polychlorinated biphenyls during pregnancy with methylation levels of H19 and long interspersed nuclear element-1 in cord blood in the Hokkaido study. *Toxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.08.010>
- Kowalska JB, Mazurek R, Gąsiorek M, Zaleski T (2018) Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environ Geochem Health* 40:2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>

- Krasnići N, Dragun Z, Erk M, Raspor B (2013) Distribution of selected essential (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, and Zn) and nonessential (Cd, Pb) trace elements among protein fractions from hepatic cytosol of European chub (*Squalius cephalus* L.). *Environ Sci Pollut Res* 20:2340–2351. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1105-8>
- Kukongviriyapan U, Apaijit K, Kukongviriyapan V (2016) Oxidative Stress and Cardiovascular Dysfunction Associated with Cadmium Exposure: Beneficial Effects of Curcumin and Tetrahydrocurcumin. *Tohoku J Exp Med* 239:25–38. <https://doi.org/10.1620/tjem.239.25>
- Laermanns H, Reifferscheid G, Kruse J, et al (2021) Microplastic in Water and Sediments at the Confluence of the Elbe and Mulde Rivers in Germany. *Front Environ Sci* 9:. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.794895>
- Lestari P, Trihadiningrum Y, Firdaus M, Warmadewanthi IDAA (2021) Microplastic pollution in Surabaya River Water and Aquatic Biota, Indonesia. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 1143:012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1143/1/012054>
- Lin L, Yang H, Xu X (2022) Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Front Environ Sci* 10:. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- Longo V, Forleo A, Ferramosca A, et al (2021) Blood, urine and semen Volatile Organic Compound (VOC) pattern analysis for assessing health environmental impact in highly polluted areas in Italy. *Environ Pollut* 286:117410. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117410>
- Mallongi A, Astuti RDP, Amiruddin R, et al (2021) Identification Source and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Metal in Soil Samples around Karst Watershed of Pangkajene, Indonesia. *Environ Nanotechnology, Monit Manag* 17:100634. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100634>

- Mallongi A, Birawida AB, Astuti RDP, Saleh M (2020a) Effect of lead and cadmium to blood pressure on communities along coastal areas of Makassar, Indonesia. *Enferm Clin* 30:. <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2020.03.001>
- Mallongi A, Birawida ABABAB, Astuti RDPRDP, Saleh M (2020b) Effect of lead and cadmium to blood pressure on communities along coastal areas of Makassar, Indonesia. *Enfermería Clínica* 30:313–317. <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2020.03.001>
- Mehmood MA, Qadri H, Bhat RA, et al (2019) Heavy metal contamination in two commercial fish species of a trans-Himalayan freshwater ecosystem. *Environ Monit Assess* 191:. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7245-2>
- Müller G (1969) Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geol J* 2:108–118
- Mullerova D, Pesta M, Dvorakova J, et al (2017) Polychlorinated Biphenyl 153 in Lipid Medium Modulates Differentiation of Human Adipocytes. *Physiol Res* 66:653–662
- Nguyen D-D, Tsai C-L, Hsu Y-C, et al (2017) PCDD/Fs and dl-PCBs concentrations in water samples of Taiwan. *Chemosphere* 173:603–611. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.087>
- Nuraini RAT, Endrawati H, Maulana IR (2017) Analisis Kandungan Logam Berat Kromium (Cr) Pada Air, Sedimen Dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Trimulyo Semarang. *J Kelaut Trop* 20:48. <https://doi.org/10.14710/jkt.v20i1.1104>
- Pandiyani J, Mahboob S, Govindarajan M, et al (2021) An assessment of level of heavy metals pollution in the water, sediment and aquatic organisms: A perspective of tackling environmental threats for food security. *Saudi J Biol Sci* 28:1218–1225. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.072>

- Rauf AU, Mallongi A, Daud A, et al (2022) Spatial Distribution and Ecological Risk of Potentially Toxic Elements in Maros Regency, Indonesia. *Carpathian J Earth Environ Sci* 17:93–100. <https://doi.org/10.26471/cjees/2022/017/203>
- Schwarzenbach RP, Westall J (1981) Transport of Non-Polar Organic Pollutants in a River Water – Groundwater Infiltration System: A Systematic Approach. pp 569–574
- Shen F, Mao L, Sun R, et al (2019) Contamination evaluation and source identification of heavy metals in the sediments from the lishui river watershed, southern China. *Int J Environ Res Public Health* 16:. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030336>
- Shirani M, Afzali KN, Jahan S, et al (2020) Pollution and contamination assessment of heavy metals in the sediments of Jazmurian playa in southeast Iran. *Sci Rep* 10:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61838-x>
- Siregar JI, Sihotang C, Simarmata AH (2015) Jenis dan Kelimpahan Perifiton pada Substrat Keramik di Sungai Salo Desa Salo Kabupaten Kampar. Universitas Riau
- Stockwell CE, Coggon MM, Gkatzelis GI, et al (2021) Volatile organic compound emissions from solvent- and water-borne coatings – compositional differences and tracer compound identifications. *Atmos Chem Phys* 21:6005–6022. <https://doi.org/10.5194/acp-21-6005-2021>
- Stoker HS, Seager SL (1977) Organic Chemical Pollution: Petroleum, Pesticides, and Detergents. In: *Environmental Chemistry*. Springer US, Boston, MA, pp 401–427
- Thévenod F (2009) Cadmium and cellular signaling cascades: To be or not to be? *Toxicol Appl Pharmacol* 238:221–239. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.01.013>

- Thévenod F (2010) Catch me if you can! Novel aspects of cadmium transport in mammalian cells. *BioMetals* 23:857–875. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9309-1>
- Thévenod F, Lee W-K (2013a) Cadmium and cellular signaling cascades: interactions between cell death and survival pathways. *Arch Toxicol* 87:1743–1786. <https://doi.org/10.1007/s00204-013-1110-9>
- Thévenod F, Lee W-K (2013b) Toxicology of Cadmium and Its Damage to Mammalian Organs. pp 415–490
- USEPA (2022) Persistent Organic Pollutants: A Global Issue, A Global Response
- Yang H, Shu Y (2015) Cadmium Transporters in the Kidney and Cadmium-Induced Nephrotoxicity. *Int J Mol Sci* 16:1484–1494. <https://doi.org/10.3390/ijms16011484>
- Yasser E-N, Shawkat E-N, Samir A (2015) Impact of Organic Contamination on Some Aquatic Organisms. *Toxicol Int* 22:45–53. <https://doi.org/10.4103/0971-6580.172256>
- Zhang P, Pan X, Wang Q, et al (2020) Toxic effects of heavy metals on the freshwater benthic organisms in sediments and research on quality guidelines in Poyang Lake, China. *J Soils Sediments* 20:3779–3792. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02700-5>
- Zheng H, Kong S, Yan Y, et al (2020) Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a petrochemical industrial park along the Yangtze River. *Sci Total Environ* 703:135505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135505>



# PENCEMARAN LOGAM BERAT DI KAWASAN PESISIR: KAJIAN MENGENAI NASIB, TRANSPORTASI, DAN TOKSISITAS

## 2.1 Pendahuluan

Sejak masa prasejarah wilayah pesisir adalah wilayah yang paling banyak dihuni oleh manusia. Hal ini dikarenakan kondisi iklim dan biofisik yang menguntungkan bagi manusia (Kay and Alder, 1999; Scialabba, 1998). *Food and Agriculture Organization (FAO)* mendefinisikan daerah pesisir sebagai daerah pertemuan atau transisi antara daratan dan lautan, dimana ia juga meliputi danau pedalaman yang besar (Scialabba, 1998). Sorensen and McCreary, (1990) mendefinisikan kawasan pesisir adalah perbatasan atau ruang tempat berubahnya dua lingkungan utama, yaitu lautan dan daratan. Pesisir adalah tempat bertemunya daratan dan lautan. Jika garis perbatasan antara laut dan daratan tetap maka wilayah pesisir akan lebih mudah didefinisikan, namun pada kenyataannya garis perbatasan ini terkadang samar karena sifat dari kawasan pesisir yang sangat dinamis dimana garis perbatasan daratan dan lautan akan terus berubah secara dinamis seiring dengan pasang surutnya air laut (Kay and Alder, 1999).

Daerah pesisir memiliki bentuk dan fungsi yang beragam, bersifat dinamis dan terkadang memiliki batasan spasial yang luas. Tidak sama dengan daerah aliran sungai, tidak ada batasan alami yang pasti dan secara jelas menggambarkan wilayah pesisir (Scialabba, 1998). Bagian lingkungan pesisir yang secara jelas berkaitan dengan daratan dan lautan diantaranya pantai, rawa pantai, hutan bakau, dan terumbu karang. Salah satu yang paling penting dari pesisir adalah sungai yang membawa air tawar dan sedimen ke lingkungan pesisir. Oleh sebab itu batasan pesisir bisa mencapai ribuan kilometer dari daerah tangkapan air. Berdasarkan uraian diatas dapat disimpulkan bahwa kawasan pesisir sebagai berikut: 1) terdiri dari komponen daratan dan lautan, 2) memiliki batasan daratan dan lautan yang ditentukan oleh tingkat pengaruh daratan terhadap lautan dan sebaliknya, 3) secara konstan wilayahnya berubah lebar, kedalaman atau ketinggiannya (Kay and Alder, 1999).

Di Indonesia berdasarkan Undang-undang No 27 Tahun 2007 tentang pengelolaan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil, wilayah pesisir didefinisikan sebagai daerah peralihan antara ekosistem darat dan laut yang dipengaruhi oleh perubahan di darat dan laut. Wilayah pesisir merupakan area yang penting dalam sektor perekonomian (Maanan et al., 2015; Scialabba, 1998). Wilayah ini merupakan wilayah pertemuan berbagai kegiatan misalnya pengiriman di pelabuhan, perkapalan, perikanan pantai, industri, pemukiman penduduk, perdagangan, perikanan, akuakultur, pertanian, dan pariwisata. Karena pesatnya pertumbuhan ekonomi di wilayah pesisir maka urbanisasi dan pertambahan jumlah penduduk rentan terjadi di wilayah pesisir. Kejadian ini akan membawa beberapa dampak pada lingkungan dan kesehatan manusia (**Gambar 1**). Salah satu kontaminan kimia yang dapat mencemari lingkungan pesisir adalah logam berat. Adapun pencemaran utama yang terjadi di wilayah pesisir diantaranya penurunan kualitas air dari kontaminan yang bersumber dari perkotaan dan industri, penurunan kualitas air dari runoff pertanian dan akuakultur, pencemaran minyak (termasuk risiko kebocoran minyak), pengangkutan bahan berbahaya dan limbah, pembuangan limbah di laut, air *ballast*, dan *hull fouling* (Kay and

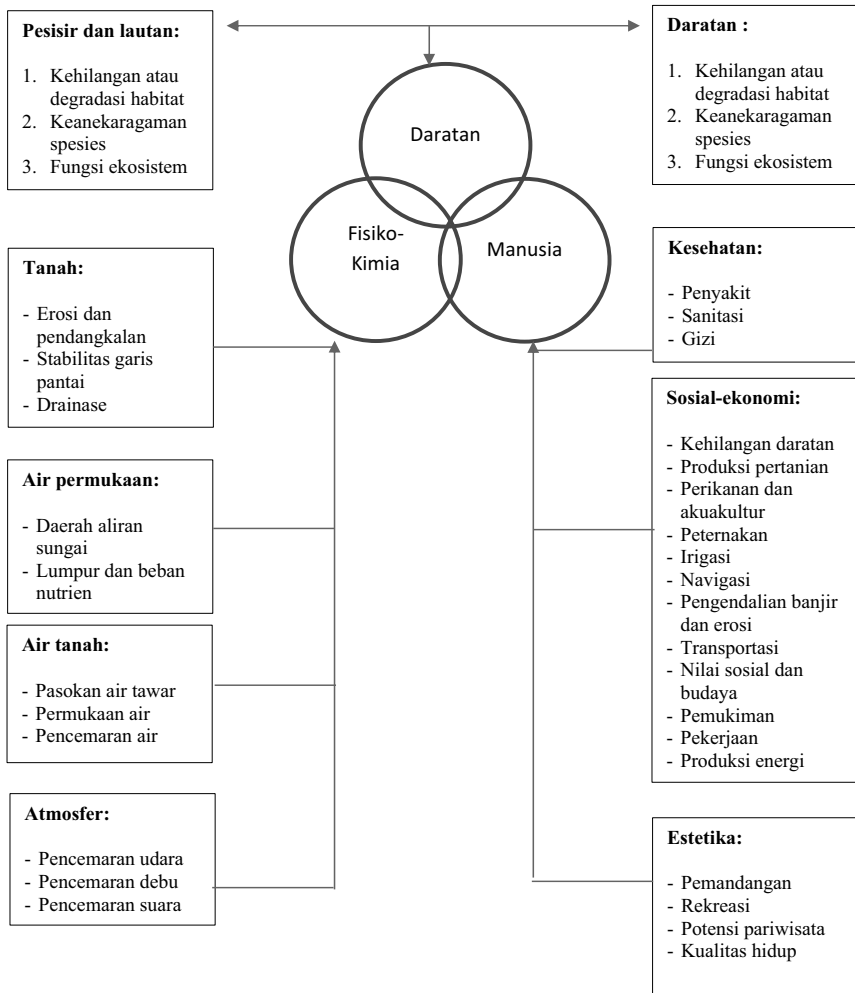


Alder, 1999). Perairan pesisir juga merupakan salah satu wilayah yang terdampak oleh pencemaran logam berat baik dari sumber alamiah maupun kegiatan manusia (Gambar 2).

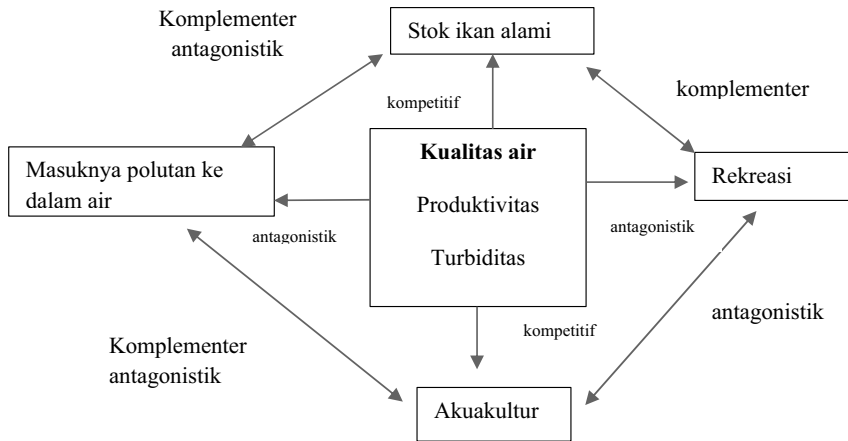
Diketahui juga bahwa ekosistem pesisir dan muara adalah ekosistem yang paling produktif di muka bumi (Maanan et al., 2015; Zhu et al., 2017) dikarenakan fungsi dan perannya dalam menyediakan berbagai layanan dan produk yang dapat digunakan oleh manusia. Wilayah ini merupakan peralihan dari daratan dan laut memiliki berbagai kompleksitas kegiatan mulai dari perikanan, industri, pemukiman, pariwisata dan lain sebagainya (Ip et al., 2007; Zhu et al., 2017). Selain itu wilayah ini juga merupakan wilayah yang sensitif terhadap peningkatan tekanan di lingkungan yang bersumber dari kegiatan manusia maupun peristiwa alamiah yang dapat mengakibatkan peningkatan kontaminasi polutan pada ekosistem (Jiang et al., 2018; Mejdoub et al., 2018; Rajaram and Ganeshkumar, 2019; Zhao et al., 2018). Wilayah ini juga merupakan salah satu sumber makanan terpenting bagi manusia, juga merupakan tempat penyimpanan utama polutan (termasuk logam berat) (Barbieri, 2016; Maanan et al., 2015). Potensi pencemaran logam berat di wilayah pesisir dapat diakibatkan oleh endapan besar logam berat dari limpasan dan input sumber pencemaran antropogenik (limbah industri, limbah domestik, sampah kapal, dll.) (Jiang et al., 2018; Zhao et al., 2018). Konsentrasi logam yang tinggi di badan air merupakan racun bagi biota laut dan manusia (Maanan et al., 2015). Hal ini dikarenakan logam toksik yang meningkat seketika dan memiliki efek signifikan pada kesehatan manusia dan masalah ini menjadi perhatian saat ini.

Perhatian terhadap pencemaran logam berat di lingkungan, khususnya wilayah pesisir mengalami peningkatan secara global karena logam berat memiliki sifat yang *persistent* di lingkungan sehingga mampu terbioakumulasi dalam jaringan organisme dan toksisitasnya yang cukup tinggi sehingga mampu menimbulkan dampak kesehatan bagi organisme dan manusia (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2019; ATSDR, 2019; Delshab et al., 2017; Lin et al., 2016; Sodrziecki et al., 2018; Yan et al., 2018; Zhuang and Gao, 2014). Logam tersebut dapat

terkonsentrasi, terakumulasi dan terbiomagnifikasi dalam fauna dan flora yang ada di ekosistem baik pada ekosistem air maupun daratan sehingga dapat mengontaminasi rantai makanan manusia yang berakibat pada timbulnya masalah kesehatan pada manusia (Jamal et al., 2013; Makokha et al., 2016).



**Gambar 2.1** Masalah terkait yang terjadi di kawasan pesisir (Kay and Alder, 1999)



**Gambar 2.2** Keterkaitan kualitas air dengan kegunaan air di perairan pesisir (Scialabba, 1998)

Keterangan: Parameter kualitas air utama diantaranya suhu, kekeruhan, produktivitas primer, BOD (*biochemical oxygen demand*), dan konsentrasi pathogen (misalnya coliform dll). Distribusi suhu (bersama dengan salinitas) akan memberikan informasi mengenai pola sirkulasi. Produktivitas primer air dapat menentukan produktivitas stok ikan, krustasea, dan moluska komersial. Suhu akan mempengaruhi laju pertumbuhan dan distribusi ikan. Kekeruhan air (seperti BOD) tidak hanya akan menentukan nilai estetika dan rekreasinya saja tetapi juga merupakan indikator kapasitas air untuk menerima nutrisi tambahan dan partikulat/limbah organik terlarut. Konsentrasi pathogen akan menjadi ancaman bagi manusia dan organisme laut (Scialabba, 1998).

## 2.2 Jenis dan Sumber Logam Berat

Logam berat dapat didefinisikan berdasarkan berat atom atau kepadatannya yang besar. Saat ini definisi logam berat digunakan untuk mendeskripsikan unsur kimia metalik dan metaloid yang bersifat toksik pada manusia dan lingkungan (Briffa et al., 2020). Adapun beberapa logam berat yang masuk ke dalam daftar bahan kimia yang diprioritaskan berdasarkan

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) karena sifat toksisitasnya dan keberadaannya di alam terangkum dalam Tabel 1. Logam berat adalah logam yang memiliki kepadatan lebih dari  $5 \text{ g/cm}^3$  (Alissa and Ferns, 2011; Järup, 2003). Menurut Palar (2012) karakteristik dari logam berat diantaranya: 1) memiliki spesifikasi graviti yang sangat besar (lebih dari 4), 2) mempunyai nomor atom 22 – 34 dan 40 – 50 serta unsur-unsur lantanida dan aktinida, 3) mempunyai respon biokimia khas (spesifik) pada organisme hidup. Logam berat terbagi menjadi dua berdasarkan toksisitasnya yaitu (Kim et al., 2019):

#### 1) Logam esensial

Logam esensial adalah logam yang memiliki fungsi penting dalam sistem biologis. Contoh dari logam esensial adalah Mn, Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Mo yang diketahui sebagai mikronutrien untuk tanaman. Logam tersebut berguna untuk pertumbuhan dan melindungi tanaman dari stress selain itu digunakan juga dalam proses biosintesis dan fungsi dari berbagai biomolekul seperti karbohidrat, klorofil, asam nukleat, kimia pertumbuhan dan metabolit sekunder (Appenroth, 2010). Dikarenakan digunakan sebagai mikronutrien maka apa apabila terjadi defisiensi logam yang terjadi adalah kondisi abnormal dan penyakit pada organisme. Interaksi antar organisme dengan logam berat juga beragam dan kompleks (Chalkiadaki et al., 2014).

#### 2) Logam non-esensial

Logam non esensial adalah logam yang sama sekali tidak memiliki fungsi dan menimbulkan dampak toksik pada organisme hidup. Contoh dari logam berat yang bersifat non esensial adalah Cr, Pb, Hg, As, Cd (ATSDR, 2019). ATSDR bahkan memasukkan logam As, Hg, Cd, Pb, Cr sebagai logam toksik yang diprioritaskan karena sifat toksik, konsentrasi dan keberadaannya di lingkungan (ATSDR, 2019; Mishra et al., 2019; Xu et al., 2018).

**Tabel 2.1** Daftar prioritas logam berat berdasarkan U.S Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).

Peringkat	Nama Logam berat	Peringkat	Nama Logam berat
1	Arsenik (As)	101	Radium (Ra)
2	Timbal (Pb)	102	Thorium (Th)
3	Merkuri (Hg)	120	Tembaga (Cu)
7	Kadmium (Cd)	136	Barium (Ba)
17	Kromium heksavalen (Cr(VI))	140	Mangan (Mn)
35	Cyanide (Cn)	147	Selenium (Se)
52	Kobalt (Co)	152	Bromium (Br)
58	Nikel (Ni)	183	Alumunium (Al)
66	Kromium trioksida (Cr(III))	201	Vanadium (V)
75	Zinc	229	Perak (Ag)
78	Kromium (Cr)	244	Antimon (Sb)
97	Uranium (U)		

Logam berat pada ekosistem perairan dapat bersumber dari sumber alamiah dan kegiatan antropogenik (Järup, 2003; Makokha et al., 2016; Tchounwou et al., 2012). Gambar 3 merupakan penggambaran dari sumber logam berat yang dapat mempengaruhi kawasan pesisir.

#### 1) Sumber alamiah

Sumber alami utama logam berat berasal dari batuan dalam kerak bumi yang mengalami pelapukan (ada dalam bentuk terlarut), letusan gunung berapi (dalam bentuk partikulat) (Callender, 2013; Mohammed et al., 2011; Nagajyoti et al., 2010; Roleda et al., 2019; RoyChowdhury et al., 2017), kebakaran hutan (Sonone et al., 2020), dan proses pelapukan batuan secara alami. Dua sumber tersebut merupakan sumber terbesar sekitar 80% dari seluruh sumber alami; kebakaran hutan dan sumber biogenik menyumbang sekitar 10% dari seluruh sumber alami (Callender, 2013). Berdasarkan kelimpahan deposit dalam lapisan tanah dan batuan, logam dapat dibedakan menjadi dua yaitu: 1) Bijih logam berat ada dalam bentuk sulfida, seperti besi, arsenik, timbal, timah-seng, kobalt, emas, perak, dan nikel sulfida dan bentuk oksida seperti alumunium, mangan, emas, selenium dan antimon, 2) logam yang ditemukan bentuk oksida dan sulfida seperti

besi, tembaga dan kobalt (Mohammed et al., 2011; Palar, 2012). Abu vulkanik dari letusan gunung berapi dapat mengeluarkan banyak logam dan mineral dari dalam perut bumi. Abu vulkanik yang dikeluarkan mampu menempuh ribuan kilometer yang dapat mengontaminasi air permukaan seperti sungai sehingga terbawa sampai ke wilayah pesisir.

## 2) Sumber antropogenik

Sumber utama dari sumber antropogenik umumnya berasal dari pertambangan, industri, proses pembakaran, transportasi, konsumsi bahan bakar minyak, pertambangan dan peleburan logam, emisi industri, efluen, pembangunan perkotaan, emisi kendaraan, pembakaran batubara untuk produksi energi, penggunaan minyak bumi untuk pembakaran di boiler, manufaktur logam non-ferrous, insenerasi limbah, pembuangan bahan limbah, sampah kompos kota, pupuk, pestisida, residu materi organik, (Callender, 2013; Edelstein and Ben-hur, 2017; Jickells and Baker, 2014; Mohammed et al., 2011; Nagajyoti et al., 2010; Pacyna et al., 2010, 2009; RoyChowdhury et al., 2017). Deposisi basah dan kering bertanggung jawab terhadap kontaminasi logam berat dalam sistem perairan. Industri dan pertambangan menjadi dua sumber terbesar yang berasal dari kegiatan manusia yang mampu meningkatkan kontaminasi logam berat di lingkungan. Timbal (Pb) biasanya diemisikan dari pembakaran bahan bakar fosil, kegiatan *smelting* biasanya menghasilkan logam arsen (As), tembaga (Cu) dan seng (Zn), sementara untuk penggunaan insektisida biasanya menghasilkan logam berat nikel (Ni), vanadium (V), merkuri (Hg), selenium (Se), dan timah (Sn) (Sonone et al., 2020). Pengelompokan sumber polusi antropogenik berdasarkan asal pencemar dibedakan lagi menjadi dua yaitu (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2017)

### a. Sumber tidak bergerak (*point source*)

*Environmental Protection Agency (EPA)* mendefinisikan sumber tidak bergerak sebagai sumber polusi yang dapat diidentifikasi dari mana polutan dilepaskan seperti pipa, parit, kapal, atau cerobong asap

pabrik. Pabrik dan tempat pengolahan limbah merupakan dua jenis sumber tidak bergerak yang umum.

b. Sumber bergerak (*non-point source*)

Sumber bergerak atau *non-point source* lebih kompleks dibandingkan dengan sumber tidak bergerak karena polutan dapat berasal dari berbagai sumber. Sumber polusi bergerak terjadi sebagai akibat dari limpasan dimana ketika terjadi hujan atau cairnya salju polutan akan bergerak melalui diatas permukaan tanah dan terserap (Gabrielyan et al., 2018). Selain itu, ia juga dapat bersumber dari hujan, pengendapan atmosfer, drainase, rembesan atau modifikasi hidrologi (US EPA, 2017).

Sumber pencemar antropogenik logam berat juga dapat dibedakan sebagai berikut (Mohammed et al., 2011):

- Penambangan dan peleburan logam (As, Cd, Pb, Hg)
- Industri (As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Zn)
- Deposisi atmosfer (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, U)
- Pertanian (As, Cd, Cu, Pb, Si, U, Zn)
- Pembuangan limbah (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Zn)

Kawasan muara dan pesisir merupakan kawasan perairan yang kompleks dan dinamis. Adanya interaksi fisik, kimia, dan biologis antara sistem air tawar dan air asin dapat memiliki pengaruh pada pengangkutan dan nasib logam berat (Ip et al., 2007). Penilaian dan pemantauan aktivitas manusia pada kawasan pesisir menjadi sangat penting karena kawasan ini terpajan oleh berbagai sumber pencemar (Kenworthy et al., 1980). Dalam sistem akuatik pemantauan pencemaran logam berat biasanya dilakukan pada air, sedimen dan biota (Nowrouzi et al., 2014). Carman *et al* (2007) menyebutkan bahwa kontribusi pencemaran di kawasan pesisir terbesar berasal dari aktivitas antropogenik di daratan (Ip et al., 2007).

Polutan masuk ke lingkungan laut sebagai limbah industri dan domestik, kapal penangkap ikan, pengiriman, kegiatan tanker minyak, kegiatan pariwisata, limbah rumah sakit, operasi penambangan, pertanian,

eksplorasi minyak/gas, serta kegiatan manusia lainnya yang berada di dekat sungai atau muara atau secara alami yang diperantarai oleh pelapukan batuan, erosi, aliran air, dan runoff (Ip et al., 2007; Makokha et al., 2016; Nour and El-Sorogy, 2017; Nour, 2019; Nowrouzi et al., 2014; Ogunfowokan et al., 2013; Zhuang and Gao, 2014). Selain itu, daerah muara dan pesisir merupakan tujuan dari kontaminan yang berasal dari sungai dan atmosfer, proses aeolian, erosi pantai dan dasar laut serta aktivitas biologis (Bastami et al., 2015; Ip et al., 2007; Suresh et al., 2015; Wu et al., 2014a, 2014b; Yang et al., 2015; Zhao et al., 2016).

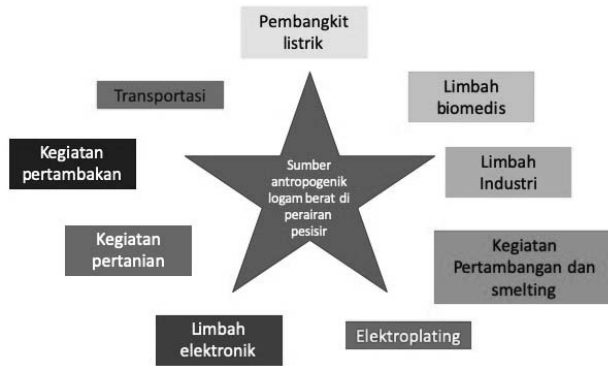
Intensifikasi dan perluasan kegiatan pertanian juga berpengaruh pada peningkatan konsentrasi logam berat di perairan. Kegiatan pertanian dapat menghasilkan polutan dalam jumlah yang besar seperti bahan agrokimia, bahan organik, residu pestisida, sedimen dan garam/mineral ke perairan. Logam berat dapat berasal dari penggunaan pupuk anorganik dan pestisida yang terbawa oleh aliran air sehingga mencemari ekosistem perairan sampai ke kawasan pesisir. Hasil dari proses pencemaran air tersebut dapat menimbulkan risiko pada ekosistem perairan, kesehatan manusia, dan aktivitas produksi bahan pangan seperti padi, sayur, dan buah. Penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti di dunia menemukan bahwa kandungan logam berat pada pupuk and pestisida cukup tinggi (Jayasumana et al., 2015; Milinovic et al., 2008; Mortvedt, 1996; Rauf et al., 2002; Westfall et al., 2005). Westfall et al., (2005) mengungkapkan bahwa pupuk fosfat mengandung As, Cd, Cr, Pb, Hg, Ni dan V masing-masing sebesar 12, 11, 109, 12, 0.05, 37, dan 82 mg/kg. Selain kegiatan pertanian, kegiatan budidaya ikan juga diketahui dapat meningkatkan konsentrasi logam berat di lingkungan perairan. Logam berat dari kegiatan budidaya ikan dapat berasal dari penggunaan pakan ikan dan kontaminasi dari air yang digunakan untuk budidaya (Sabbir et al., 2018; Sarkar et al., 2022; Tahity et al., 2022). Menurut Sabbir et al., (2018) konsentrasi rata-rata Cd, Pb, dan Cr dalam pakan ikan masing-masing sebagai berikut 0.29 mg/kg, 8.49 mg/kg, dan 8.57 mg/kg.



Logam berat secara alamiah dilepaskan ke tanah dan air permukaan oleh proses pelapukan dan aktivitas vulkanik, namun pelepasan polutan dan bahan kimia secara cepat meningkat di lingkungan karena adanya sumber antropogenik. Kegiatan antropogenik sangat mengubah siklus geokimia logam, mengakibatkan kontaminasi lingkungan yang luas (Nriagu and Pacyna, 1988). Diketahui juga bahwa aktivitas antropogenik merupakan sumber utama polutan dan bahan kimia di lingkungan (Pachana et al., 2010). Sejauh mana kegiatan antropogenik berkontribusi pada siklus distribusi logam berat dapat dijelaskan oleh faktor pengayaan antropogenik atau *antropogenic enrichment factor* yang merupakan persentase proporsional dari emisi logam berat antara sumber antropogenik dan sumber alamiah (Tabel 2). Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa sumber antropogenik berpengaruh pada pengayaan logam berat (Hg, Cd, Pb, dan Zn) di lingkungan. Namun, untuk peningkatan mangan di lingkungan masih dipengaruhi oleh sumber alamiah. Berdasarkan laporan Verry and Vermette, (1992) sumber logam berat yang masuk ke wilayah perairan pesisir dapat berasal dari input atmosferik dengan deposisi basah, pelarutan logam dari sungai, dan input dari sungai (Tabel 3). Berdasarkan laporan yang sama diketahui kontribusi wilayah perkotaan menjadi sumber logam berat terbesar di dunia (Verry and Vermette, 1992).

Pencemaran yang ada di kawasan pesisir laut memiliki keterkaitan dengan sumber polusi di muara dan aliran sungai. Polutan akan dibawa oleh aliran sungai ke lingkungan laut melalui muara. Selain itu sumber lain yang dapat menimbulkan dampak pencemaran logam berat adalah kegiatan reklamasi yang dilakukan di wilayah pesisir (Xu et al., 2018; Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2017). Proyek reklamasi juga membawa dampak pada penurunan kualitas lingkungan dan ekosistem, hilangnya fungsi dan layanan ekosistem pesisir secara berkelanjutan, hilangnya mata pencaharian nelayan, meningkatkan risiko bencana terkait kejadian iklim ekstrem, perubahan panjang garis pantai dan wilayah laut, merubah proses fisik, kimia dan biologis habitat intertidal, potensi pencemaran logam berat pada

air tanah, biota dan tanaman, serta hilangnya habitat yang sehat (Xu et al., 2018; Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2017).



**Gambar 2.3** Sumber antropogenik logam berat di kawasan pesisir

**Tabel 2.2** Faktor pengayaan antropogenik (FPA) untuk total emisi logam berat secara global pada tahun 1980an (seluruh nilai dinyatakan dalam  $10^6$  kg/tahun)

Logam berat	Sumber antropogenik (A)	Sumber alamiah	Total	FPA (A/T) (100%)
Merkuri (Hg)	100	50	150	66
Kadmium (Cd)	8	1	9	89
Timbal (Pb)	300	10	310	97
Seng (Zn)	130	50	180	72
Mangan (Mn)	40	300	340	12

Sumber: (Walker et al., 2012)

**Tabel 2.3** Kontribusi input sungai, pelarutan logam berat di sungai dan input atmosfer ke lautan

Logam berat	Terlarut di sungai (ng.L <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	Input sungai (x10 <sup>9</sup> g.tahun <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	Input atmosfer (x10 <sup>9</sup> g.tahun <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>
As	47	1.6	5.8
Cd	2.1	0.07	3.2
Cr	172	5.8	-
Cu	115	4.0	34
Hg	0.82	0.03	1.7
Mo	12	0.41	-
Ni	135	4.6	25
Pb	8.5	0.29	88
Sb	14	0.48	-
Se	35	1.2	-
Zn	165	5.6	136

*Sumber: (Verry and Vermette, 1992)*

### 2.3 Nasib logam berat di lingkungan

Proses transportasi logam berat dalam perairan digambarkan pada **Gambar 4**. Transportasi logam berat dalam sedimen ke lautan lepas dapat dilihat pada **Gambar 5**. Ketika logam berat dilepaskan ke lingkungan, logam berat dapat berpindah dan bertransformasi menjadi bentuk kimia lain. Transportasi logam berat dapat terjadi antar satu kompartemen ke kompartemen lainnya di lingkungan. Proses transformasi di lingkungan dapat meliputi proses fotodegradasi (misalnya dengan bantuan sinar UV) atau degradasi kimia (misalnya hidrolisis) atau dengan biodegradasi (misalnya dekomposisi bakteri) (Pachana et al., 2010; Raja Sathendra et al., 2018). Logam berat juga dapat bertransformasi dalam tubuh organisme yang disebut sebagai biotransformasi (Pachana et al., 2010). **Gambar 6** merupakan contoh dari proses transformasi arsen di lingkungan perairan. Di lingkungan alamiahnya, arsenik memiliki 2 bentuk oksidasinya yaitu As(III) dan As(V) (Fatoki and Badmus, 2022). Proses transformasinya dapat diperantarai oleh organisme seperti ragi, fungi, dan bakteri yang nantinya

akan membatu proses metilasi arsenik dalam perairan sehingga membentuk arsenik organik (dimethylarsinic acid (DMA) dan monomethylarsonic acid (MMA)) dan gas turunan dari arsine. Pada siklus transportasi merkuri (Hg) dapat berasal dari deposisi basah Hg dari atmosfer ketika terjadi hujan asam (Verry and Vermette, 1992). Selain itu, Hg ditransportasikan ke air permukaan melalui limpasan permukaan dimana Hg terikat dengan partikel organik dan anorganik. Sedimen yang mengandung banyak sulfur mengikat dengan kuat merkuri di perairan (Pachana et al., 2010). Terdapat tiga bentuk utama merkuri di alam yaitu Hg<sup>0</sup>, ion merkuri dalam garam dan kompleks (Hg<sup>2+</sup>), atau senyawa organik merkuri seperti garam fenil merkuri yang banyak dipergunakan dalam pembuatan fungisida dan herbisida, senyawa alkil-merkuri termasuk metil merkuri yang berbahaya bagi organisme laut dan manusia (Pachana et al., 2010).

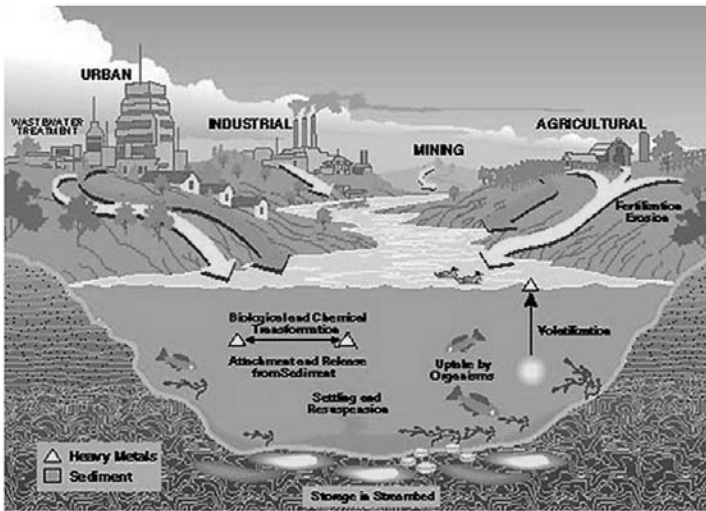
Diketahui konsentrasi kadmium pada air tawar tidak terpolusi adalah < 1 ppb, sedangkan konsentrasi kadmium pada air laut berkisar antara 0.05 sampai 0.2 ppb dengan konsentrasi rata-rata sebesar 0.15 ppb (Forstner and Wittmann, 1983). Konsentrasi latar belakang adalah konsentrasi suatu bahan kimia pada satu kompartemen lingkungan (misalnya tanah, air, atau udara) dimana kompartemen lingkungan tersebut belum terkontaminasi atau keberadaan zat kimia tersebut masih secara alami terdapat di lingkungan. Konsentrasi latar belakang dari beberapa logam berat pada air laut terdapat pada Tabel 4. Apabila konsentrasi logam berat lebih dari konsentrasi latar belakangnya maka keberadaan logam tersebut di lingkungan telah mengalami pengayaan dari sumber antropogenik.

**Tabel 2.4** Konsentrasi latar belakang beberapa logam berat di air laut (Forstner and Wittmann, 1983)

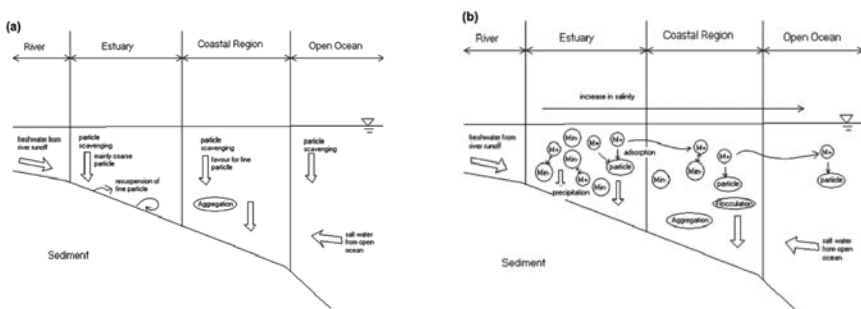
<b>Logam berat</b>	<b>Konsentrasi (µg/L)</b>
Arsenik	2.1
Kadmium	(s) 0.07 (d)
Kromium	0.08 (s) 0.15 (d)
Kobalt	0.04

Logam berat	Konsentrasi ( $\mu\text{g/L}$ )
Timbal	0.005 – 0.015 (s) 0.001 (d)
Mangan	0.2
Merkuri	0.01
Nikel	0.2 (s) 0.7 (d)

Keterangan: s untuk air permukaan; d untuk air laut dalam

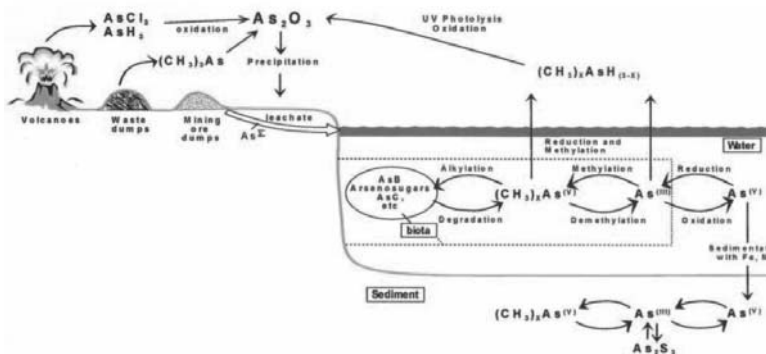


**Gambar 2.4** Transportasi logam berat ke lingkungan perairan (Selvi et al., 2019)



**Gambar 2.5** Distribusi logam berat pada sedimen dari sungai ke lautan lepas (Ip et al., 2007)

Kawasan pesisir merupakan kawasan yang penting karena merupakan kawasan pencampuran yang menyatukan air asin dan air tawar dan dicirikan oleh komponen fisika dan kimia yang kuat. Selain itu, kadar salinitas juga merupakan faktor utama pada keberadaan bahan kimia dan polutan dalam kompartemen lingkungan pesisir seperti air dan sedimen. Keberadaan logam berat di lingkungan pesisir dipengaruhi oleh proses presipitasi dan ko-presipitasi zat terlarut, serta proses adsorpsi dimana proses-proses tersebut mampu membantu dalam melarutkan dan menghilangkan logam berat di lingkungan pesisir, sedangkan proses resuspensi logam berat dalam sedimen dan solubilitas partikulat mampu meningkatkan konsentrasi logam berat dalam fase terlarut (McComb, 2014) (Gambar 5).



**Gambar 2.6** Proses transformasi arsen (As) dalam lingkungan perairan (Raab and Feldmann, 2003)

## 2.4 Efek Dari Paparan Logam Berat

Logam berat memiliki sifat yang sulit untuk didegradasi di lingkungan sehingga ia memiliki potensi untuk terakumulasi di lingkungan. Terakumulasinya logam berat di lingkungan perairan termasuk kawasan pesisir dapat membawa dampak negatif bukan hanya pada organisme akuatik air payau dan air asin, tetapi juga pada manusia karena sifat dari

logam berat yang mampu terakumulasi dalam jaringan tubuh. Kontaminan logam berat di perairan ada dalam bentuk tidak terlarut atau tersuspensi. Logam berat tersebut dapat turun atau tersedimentasi ke dasar perairan dan teradsorpsi oleh organisme perairan (Olaifa et al., 2010a, 2010b). Toksisitas logam berat pada organisme perairan dapat sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya alkalinitas, kesadahan, pH, *dissolved oxygen*, suhu, dan turbiditas air (Yadav et al., 2020). Misalnya suhu yang tinggi dapat meningkatkan aktivitas biologis dan laju respirasi ikan yang berakibat pada tingginya laju metabolis dan aktivitas makan dari ikan (I. Simionov et al., 2019). pH lingkungan perairan mempengaruhi spesiasi logam berat yang juga akan berdampak pada fisiologis biota akuatik. Selain faktor fisikokimia, faktor dari organisme seperti kecepatan makan, waktu transit logam berat enteral, dan efisiensi pencernaan juga akan mempengaruhi toksisitas logam berat (Pachana et al., 2010).

Logam berat diketahui sebagai zat berbahaya yang memiliki sifat persisten di lingkungan. Keberadaannya di lingkungan baik perairan maupun daratan dapat berpotensi untuk terakumulasi dan terbiomagnifikasi pada organisme di rantai makanan (Järup, 2003; Järup and Åkesson, 2009; Tchounwou et al., 2012). Logam berat non esensial memiliki sifat racun pada tanaman, hewan dan manusia pada konsentrasi yang rendah (Ali et al., 2019). Meskipun demikian logam esensial juga dapat menyebabkan keracunan pada organisme dalam konsentrasi yang tinggi (Mahboob et al., 2014). Toksisitas mengacu pada sifat kimia yang dapat berakibat pada ketahanan, pertumbuhan, dan reproduksi organisme. Diketahui bahwa beberapa logam berat dapat menyebabkan karsinogenik, mutagenik, dan/atau teratogenik pada spesies yang berbeda tergantung pada dosis dan durasi pajanannya (Aldavood et al., 2020; Amoatey and Baawain, 2019; ATSDR, 2019; David and Cosio, 2020; Ellis et al., 2020; Farid et al., 2016; Mishra et al., 2019; Nabinger et al., 2018; Park and Kim, 2020; Salem et al., 2021; I.-A. Simionov et al., 2019; Singh et al., 2011; Tchounwou et al., 2012).

Bioakumulasi logam diketahui berpengaruh pada perubahan pengaturan ion, stress oksidatif, kerusakan DNA, dan dampak pada

tingkat seluler yang membawa dampak selanjutnya pada individu dan populasi (Valavanidis et al., 2006). Diketahui bahwa pajanan kadmium pada *Anodonta anatine* dapat mempengaruhi karbonik anhidrase yaitu enzim yang berguna dalam proses osmoregulasi dan metabolisme kalsium dalam jaringan (Huong, 2008; Ngo et al., 2011). Logam berat secara potensial terakumulasi pada lingkungan akuatik termasuk air, sedimen dan biota (misalnya ikan, kerang dll) selanjutnya dipindahkan ke manusia melalui makanan (Amado Filho and Rebelo, 2008; Mahboob et al., 2014). Logam berat seperti kadmium juga memiliki peran dalam penurunan populasi kerang air tawar karena tingginya toksisitas, potensi bioakumulasi dan transfer logam tersebut melalui rantai makanan (Mahboob et al., 2014; Mishra et al., 2019; Ngo et al., 2011). Waktu paruh dari logam berat pada masing-masing organisme juga berbeda-beda. Retensi logam berat pada tubuh organisme bergantung pada banyak faktor seperti spesiasi logam, mekanisme fisiologis organisme meliputi pengaturan homeostasis, dan detoksifikasi logam berat (Ali et al., 2019).

Lingkungan pesisir adalah wilayah aktivitas biogeokimia yang penting dimana proses dinamis dan kompleks dapat menghasilkan ekosistem yang sangat produktif bagi kepentingan ekologis dan komersial (Prego et al., 2013). Organisme yang hidup di lingkungan yang tercemar berada dalam kondisi yang kritis karena kemampuan untuk menyerap, akumulasi, dan detoksifikasi logam berat (Muñoz-Vera et al., 2016). Organisme akuatik seperti ikan tidak dapat menghindari dampak negatif pajanan logam berat dimana logam berat akan mempengaruhi pertumbuhan, kesehatan, kelangsungan hidup dan perkembangan organisme perairan (Hashiguchi et al., 2021; Kibria et al., 2016; O'Neill, 1981; Pragnya et al., 2020). Logam berat teradsorpsi pada tubuh ikan dapat melalui tiga cara yaitu insang, permukaan tubuh, dan saluran pencernaan (Pachana et al., 2010). Akumulasi logam berat dapat berlangsung dalam insang, hati, ginjal, dan otot dari ikan (Ju et al., 2017).

Logam berat seperti Hg, Pb, Cr, As dan Ni lebih banyak terakumulasi di ginjal dan saluran pencernaan dibandingkan dengan otot, insang dan hati



(Ju et al., 2017). Cu, Zn, dan Mn lebih banyak terakumulasi pada bagian ginjal dan saluran pencernaan pada ikan. Tingginya akumulasi logam berat pada bagian pencernaan berkaitan dengan pajanan melalui jalur oral/ingesti sebagai jalur utama pajanan logam (Rajkowska and Protasowicki, 2013). Logam merupakan zat non-biodegradable yang proses detoksifikasinya dari tubuh dapat melalui proses menyembunyikan ion logam aktif di dalam protein seperti metallothionein atau menyimpan logam berat tersebut dalam bentuk yang tidak terlarut dalam butiran intraseluler untuk penyimpanan jangka panjang atau diekskresikan dalam feses (Pachana et al., 2010).

Dampak yang ditimbulkan dari pajanan logam berat di lingkungan perairan adalah gangguan pada keseimbangan ekologis dan menurunkan keanekaragaman organisme di perairan (Baby et al., 2011; Rouane-Hacene et al., 2018). Hal ini dikarenakan logam berat dapat mengubah komunikasi kimia antara individu dalam “gangguan informasi” yang berdampak pada hubungan ekologis pada sesama spesies maupun antar spesies (Boyd, 2010). Gangguan informasi ini mempengaruhi perilaku hewan dan struktur sosialnya sehingga dapat memodifikasi interaksi intra dan inter spesies (Boyd, 2010). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Aldavood et al., (2020) pajanan kadmium dan nikel mampu mempengaruhi pergerakan dan perkembangan embrio *zebrafish*.

Adapun dampak lain yang ditimbulkan dari pajanan logam berat pada organisme perairan diantaranya deformitas tulang, kelainan fungsi ginjal, kerusakan seluler pada sel hati, dan gangguan pertumbuhan (Boening, 2000, 1999; Das et al., 2014). Pada tanaman alga, logam berat dapat mengganggu proses fotosintesis (Das et al., 2014). Keberadaan logam berat pada hewan air tidak hanya menunjukkan kontaminasi pada habitatnya tetapi juga menyiratkan risiko toksik terhadap organisme pada strata yang lebih tinggi, termasuk manusia (Luo et al., 2014; Tabari et al., 2010).

Manusia dapat terpajan oleh logam berat yang terakumulasi di lingkungan pesisir melalui dua cara, yaitu (Astuti et al., 2022):

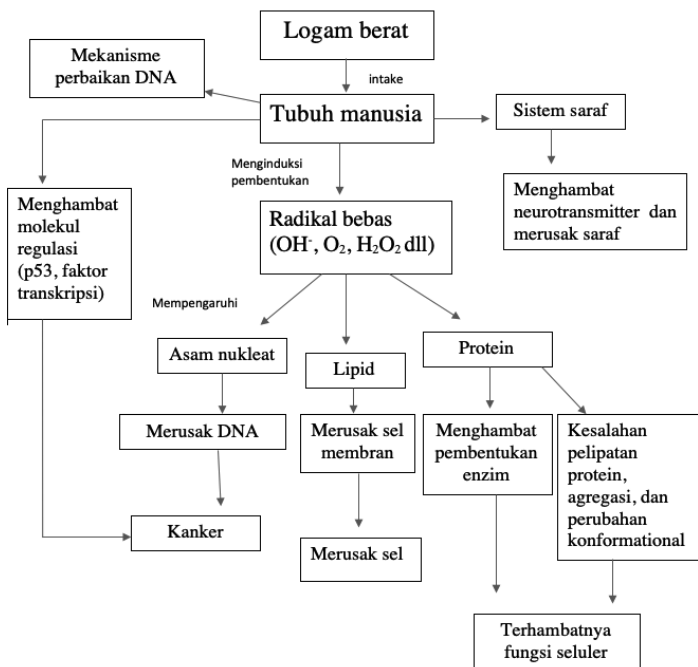
### 1. Secara langsung

Pajanan logam berat secara langsung adalah apabila manusia melakukan aktivitas rekreasi di kawasan pesisir misalnya berenang, memancing dll. Kegiatan renang di air yang terkontaminasi oleh logam berat dapat langsung memajan manusia melalui pajanan kulit dan pajanan oral/ingesti yang tidak sengaja (meminum air saat berenang). Selain itu, masyarakat di kawasan pesisir juga berpotensi untuk terpajan logam berat dari sumber air minumannya seperti air sumur (Indirawati, 2018; Luo et al., 2022; Rochaddi et al., 2019; Suryono et al., 2007; Wen et al., 2019). Kondisi di pesisir memungkinkan logam berat dapat mengontaminasi air sumur warga melalui intrusi air laut dan perembesan logam berat pada akuifer.

### 2. Secara tidak langsung

Pajanan logam berat secara tidak langsung didapatkan ketika manusia terpajan melalui rantai makanan. Logam berat mampu terabsorpsi dalam tubuh organisme perairan seperti ikan, kerang, udang dll. Keberadaan logam berat dalam daging organisme perairan mampu menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat yang terbiasa mengonsumsi hasil laut, khususnya masyarakat yang bertempat tinggal di kawasan pesisir.

Efek toksik dari pajanan logam berat dapat dijelaskan dalam skema berikut (Gambar 6). Peningkatan konsentrasi logam berat dalam tubuh dapat meningkatkan pembentukan *reactive oxygen species* (ROS) yang akan mengakibatkan kerusakan pada sel karena berkurangnya pertahanan dari antioksidan (Collin et al., 2022). Gangguan pada fungsi seluler dapat menyebabkan gangguan kesehatan kronis pada manusia. Adapun beberapa penyakit yang dapat diinduksi dari terakumulasinya logam berat pada jaringan tubuh terangkum dalam Tabel 5.



**Gambar 2.6** Mekanisme toksistas logam berat dalam tubuh manusia

**Tabel 2.5** Efek Paparan logam berat pada kesehatan manusia

Logam Berat	Sumber Utama	Organ yang paling terdampak	Efek pada Kesehatan Manusia
Arsenik (As)	Pestisida, fungisida, peleburan logam, erosi deposit alamiah, limpasan limbah dari pabrik/manufaktur gelas dan elektronik	Sistem saraf pusat, paru-paru, saluran pencernaan, sistem peredaran darah, ginjal.	Bronkitis, dermatitis, keracunan, gangguan pernafasan, penyakit vaskuler tepi, lesi kulit (melanosis, keratosis), penyakit paru obstruktif, kehilangan pendengaran, kelainan hematologi, kelainan neurobehavioral,

Logam Berat	Sumber Utama	Organ yang paling terdampak	Efek pada Kesehatan Manusia
			abnormalitas pada perkembangan, penyakit neurologis, arsenikosis, gastroenteritis, kanker
Kadmium (Cd)	Pengelasan, Cat, electroplating, pupuk pestisida, baterai Cd dan Ni, pembangkit fisi nuklir, korosi pipa galvanisasi, pembuangan dari	Ginjal, tulang, hati, paru-paru.	Disfungsi dan kerusakan ginjal, penyakit paru-paru, kanker paru-paru, bronkiolitis, COPD, emfisema, fibrosis, kelainan tulang (osteomalasia, osteoporosis, itai-itai disease), peningkatan tekanan darah, bronchitis, gangguan sistem gastrointestinal, kanker
Timbal (Pb)	Cat, pestisida, rokok, emisi kendaraan, pertambangan, pembakaran batu bara, korosi sistem perpipaan rumah tangga, erosi dari deposit alami	Sistem saraf pusat, eritropoesis, ginjal, hati.	Retardasi mental pada anak-anak, gangguan neurodevelopmental, gangguan neurologis, keterlambatan perkembangan, ensefalopati pada bayi, kelumpuhan bawaan, <i>sensor neural deafness</i> (tuli), kerusakan akut atau kronik sistem saraf, epilepticus, kerusakan hati, ginjal dan gastrointestinal, peningkatan tekanan darah

Logam Berat	Sumber Utama	Organ yang paling terdampak	Efek pada Kesehatan Manusia
Merkuri (Hg)	Pestisida, baterai, industri kertas	Sistem saraf pusat, ginjal, hati, paru-paru.	Kanker, kerusakan ginjal, penyakit neurologis, tremor, gangguan kemampuan intelektual dan masalah perilaku pada anak, alergi (eksim), oral lichen, gingivitis, perubahan minor psikologis, acrodynia yang ditandai dengan tangan dan kaki berwarna merah jambu, aborsi spontan, kerusakan sistem saraf, keracunan protoplasma,
Kromium (Cr)	Tambang, sumber mineral, pembuangan dari pabrik baja dan kertas	Kulit, paru-paru, saluran pencernaan, ginjal	Kerusakan sistem saraf, kelelahan, iritabilitas, kanker, asma, ulkus septum nasal, gangguan imunologi, gangguan neurologis )pusing, sakit kepala, ,kelemahan), gangguan ginjal, efek teratogenic dan dermatitis

**Sumber:** \*Singh et al., 2011; \*\*United States Environmental Protection Agency (U.S EPA), 2009; (Järup, 2003); \*\*\*(Bjørklund et al., 2018); (Alissa and Ferns, 2011; Baruthio, 1992; Diez, 2008; Goyer, 1993; Guha Mazumder, 2008; Independent Environmental Technical Evaluation Group (IETEG), 2005; Mitra et al., 2022; Nawrot et al., 2010; Raja Sathendra et al., 2018)

## 2.5 Simpulan

Lingkungan pesisir adalah wilayah aktivitas biogeokimia yang penting dimana proses dinamis dan kompleks dapat menghasilkan ekosistem yang sangat produktif bagi kepentingan ekologis dan manusia. Karena tingkat kompleksitasnya yang tinggi, wilayah ini menjadi rentan terhadap pencemaran bahan-bahan kimia salah satunya adalah logam berat. Logam berat yang masuk ke wilayah pesisir dapat berasal dari sumber antropogenik dan alamiah. Keberadaan logam berat yang tinggi di kawasan pesisir ini berpotensi membawa dampak yang buruk bagi sistem ekologis dan kesehatan manusia. Pada bab ini telah dijelaskan beberapa dampak yang dapat ditimbulkan dari pajanan logam berat terhadap kesehatan manusia dan organisme akuatik. Pengendalian pencemaran logam berat di kawasan pesisir menjadi sangat penting karena melibatkan banyak aspek kehidupan.

## Daftar Pustaka

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2019. Toxicological Profile for Lead, Draft for Public Comment.
- Aldavood, S.J., Abbott, L.C., Evans, Z.R., Griffin, D.J., Lee, M.D., Quintero-Arevalo, N.M., Villalobos, A.R., 2020. Effect of Cadmium and Nickel Exposure on Early Development in Zebrafish (*Danio rerio*) Embryos. *Water* 12, 3005. <https://doi.org/10.3390/w12113005>
- Ali, H., Khan, E., Ilahi, I., 2019. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *J. Chem.* 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Alissa, E.M., Ferns, G.A., 2011. Heavy metal poisoning and cardiovascular disease. *J. Toxicol.* 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/870125>
- Amado Filho, G.M., Rebelo, M.D.F., 2008. Heavy metals in benthic organisms from. *Brazil J. Biol.* 68, 95–100.

- Amoatey, P., Baawain, M.S., 2019. Effects of pollution on freshwater aquatic organisms. *Water Environ. Res.* 91, 1272–1287. <https://doi.org/10.1002/wer.1221>
- Appenroth, K.J., 2010. What are “heavy metals” in Plant Sciences? *Acta Physiol. Plant.* 32, 615–619. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0455-4>
- Astuti, R.D.P., Mallongi, A., Choi, K., Amiruddin, R., Hatta, M., Tantrakarnapa, K., Rauf, A.U., 2022. Health risks from multiroute exposure of potentially toxic elements in a coastal community: A probabilistic risk approach in Pangkep Regency, Indonesia. *Geomatics, Nat. Hazards Risk* 13. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2041110>
- ATSDR, 2019. ATSDR’s Substance Priority List [WWW Document]. URL <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html> (accessed 12.25.20).
- Baby, J., Raj, J., Biby, E., Sankarganesh, P., Jeevitha, M., Ajisha, S., Rajan, S., 2011. Toxic effect of heavy metals on aquatic environment. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4, 939–952. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i4.62976>
- Barbieri, M., 2016. The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *J. Geol. Geophys.* 5, 1–4. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>
- Baruthio, F., 1992. Toxic effects of chromium and its compounds. *Biol. Trace Elem. Res.* 32, 145–153. <https://doi.org/10.1007/BF02784599>
- Bastami, K.D., Neyestani, M.R., Shemirani, F., Soltani, F., Haghparast, S., Akbari, A., 2015. Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspian Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 92, 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.035>
- Bjørklund, G., Aaseth, J., Chirumbolo, S., Urbina, M.A., Uddin, R., 2018. Effects of arsenic toxicity beyond epigenetic modifications. *Environ. Geochem. Health* 40, 955–965. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9967-9>

- Boening, D.W., 2000. Ecological effects, transport and fate of mercury: general review. *Chemosphere* 40, 1335–1351.
- Boening, D.W., 1999. An Evaluation of Bivalves As Biomonitors of Heavy. *Environ. Monit. Assess.* 55, 459–470.
- Boyd, R.S., 2010. Heavy metal pollutants and chemical ecology: Exploring new frontiers. *J. Chem. Ecol.* 36, 46–58. <https://doi.org/10.1007/s10886-009-9730-5>
- Briffa, J., Sinagra, E., Blundell, R., 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 6, e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Callender, E., 2013. Heavy Metals in the Environment - Historical Trends, 2nd ed, *Treatise on Geochemistry: Second Edition*. Published by Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00903-7>
- Chalkiadaki, O., Dassenakis, M., Lydakis-Simantiris, N., 2014. Bioconcentration of Cd and Ni in various tissues of two marine bivalves living in different habitats and exposed to heavily polluted seawater. *Chem. Ecol.* 30, 726–742. <https://doi.org/10.1080/02757540.2014.917172>
- Collin, M.S., Venkatraman, S.K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S.M., Stacey, R.G.S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G.I., Senatov, F., Koppala, S., Swamiappan, S., 2022. Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *J. Hazard. Mater. Adv.* 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Das, S., Raj, R., Mangwani, N., Dash, H.R., Chakraborty, J., 2014. Heavy Metals and Hydrocarbons: Adverse Effects and Mechanism of Toxicity, Microbial Biodegradation and Bioremediation. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800021-2.00002-9>



- David, E., Cosio, C., 2020. New Insights into Impacts of Toxic Metals in Aquatic Environments. *Environments* 8, 1. <https://doi.org/10.3390/environments8010001>
- Delshab, H., Farshchi, P., Keshavarzi, B., 2017. Geochemical distribution, fractionation and contamination assessment of heavy metals in marine sediments of the Asaluyeh port, Persian Gulf. *Mar. Pollut. Bull.* 115, 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.033>
- Diez, S., 2008. Human health effects of methylmercury exposure. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 198, 133–167. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09646-9>
- Edelstein, M., Ben-hur, M., 2017. *Scientia Horticulturae* Heavy metals and metalloids : Sources , risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.039>
- Ellis, L.A., Kissane, S., Hoffman, E., Brown, J.B., Valsami-Jones, E., Colbourne, J., Lynch, I., 2020. Multigenerational Exposures of *Daphnia Magna* to Pristine and Aged Silver Nanoparticles: Epigenetic Changes and Phenotypical Ageing Related Effects. *Small* 16, 2000301. <https://doi.org/10.1002/sml.202000301>
- Farid, A.M., Lubna, A., Choo, T.G., Rahim, M.C., Mazlin, M., 2016. A Review on the Chemical Pollution of Langat River, Malaysia. *Asian J. Water, Environ. Pollut.* 13, 9–15. <https://doi.org/10.3233/AJW-160002>
- Fatoki, J.O., Badmus, J.A., 2022. Arsenic as an environmental and human health antagonist: A review of its toxicity and disease initiation. *J. Hazard. Mater. Adv.* 5, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100052>
- Forstner, U., Wittmann, G., 1983. *Metal pollution in the aquatic environment*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/9783642693854>

- Gabrielyan, A. V., Shahnazaryan, G.A., Minasyan, S.H., 2018. Distribution and Identification of Sources of Heavy Metals in the Voghji River Basin Impacted by Mining Activities (Armenia). *J. Chem.* 2018, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/7172426>
- Goyer, R.A., 1993. Lead toxicity: Current concerns. *Environ. Health Perspect.* 100, 177–187. <https://doi.org/10.1289/ehp.93100177>
- Guha Mazumder, D.N., 2008. Chronic arsenic toxicity & human health. *Indian J. Med. Res.* 128, 436–447.
- Hashiguchi, Y., Zakaria, M.R., Toshinari, M., Mohd Yusoff, M.Z., Shirai, Y., Hassan, M.A., 2021. Ecotoxicological assessment of palm oil mill effluent final discharge by zebrafish (*Danio rerio*) embryonic assay. *Environ. Pollut.* 277, 116780. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116780>
- Huong, N.T.T., 2008. EFFECTS OF CADMIUM ON CALCIUM HOMEOSTASIS AND PHYSIOLOGICAL CONDITION OF THE FRESHWATER MUSSEL, ANODONTA ANATINA. University of Bayreuth Germany.
- Independent Environmental Technical Evaluation Group (IETEG), 2005. Chromium (VI) Handbook, *The British Journal of Psychiatry*. CRC Press, Washington D.C. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Indirawati, S.M., 2018. Model Pengelolaan Risiko Dampak Pencemaran Logam Berat (Pb dan Cd) Berbasis Studi Analisis Risiko Kesehatan ingkungan Pada Masyarakat Yang Terpapar Di Kawasan Pesisir Belawan. Disertasi 1–177.
- Ip, C.C.M., Li, X.D., Zhang, G., Wai, O.W.H., Li, Y.S., 2007. Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China. *Environ. Pollut.* 147, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.028>

- Jamal, Q., Durani, P., Khan, K., 2013. Heavy Metals Accumulation and Their Toxic Effects: Review. *J. Bio- ...* 1, 27–36.
- Järup, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination 68, 167–182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Järup, L., Åkesson, A., 2009. Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 238, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.04.020>
- Jayasumana, C., Fonseka, S., Fernando, A., Jayalath, K., Amarasinghe, M., Siribaddana, S., Gunatilake, S., Paranagama, P., 2015. Phosphate fertilizer is a main source of arsenic in areas affected with chronic kidney disease of unknown etiology in Sri Lanka. *Springerplus* 4, 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-0868-z>
- Jiang, Q., He, J., Ye, G., Christakos, G., 2018. Heavy metal contamination assessment of surface sediments of the East Zhejiang coastal area during 2012–2015. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 163, 444–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.107>
- Jickells, T.D., Baker, A.R., 2014. Biogeochemical cycles: Heavy Metals, Second Edi. ed, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition.* Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00018-9>
- Ju, Y.-R., Chen, C.-W., Chen, C.-F., Chuang, X.-Y., Dong, C.-D., 2017. Assessment of heavy metals in aquaculture fishes collected from southwest coast of Taiwan and human consumption risk. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 124, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.04.003>
- Kay, R., Alder, J., 1999. *Coastal Planning and Management, Second Edition.*
- Kenworthy, J.B., Forstner, U., Wittman, G.T.W., 1980. Metal Pollution in the Aquatic Environment., *The Journal of Ecology.* <https://doi.org/10.2307/2259434>

- Kibria, G., Hossain, M.M., Mallick, D., Lau, T.C., Wu, R., 2016. Monitoring of metal pollution in waterways across Bangladesh and ecological and public health implications of pollution. *Chemosphere* 165, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.121>
- Kim, J.J., Kim, Y.S., Kumar, V., 2019. Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 54, 226–231. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.05.003>
- Lin, Q., Liu, E., Zhang, E., Li, K., Shen, J., 2016. Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China. *Catena* 145, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.003>
- Luo, J., Ye, Y., Gao, Z., Wang, W., 2014. Essential and nonessential elements in the red-crowned crane *Grus japonensis* of Zhalong Wetland, northeastern China. *Toxicol. Environ. Chem.* 96, 1096–1105. <https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1007989>
- Luo, M., Zhang, Y., Li, H., Hu, W., Xiao, K., Yu, S., Zheng, C., Wang, X., 2022. Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: The role of groundwater discharge. *Sci. Total Environ.* 807, 151070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070>
- Maanan, Mohamed, Saddik, M., Maanan, Mehdi, Chaibi, M., Assobhei, O., Zourarah, B., 2015. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecol. Indic.* 48, 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.034>
- Mahboob, S., Alkkahem Al-Balwai, H.F., Al-Misned, F., Al-Ghanim, K.A., Ahmad, Z., 2014. A study on the accumulation of nine heavy metals in some important fish species from a natural reservoir in Riyadh,

- Saudi Arabia. *Toxicol. Environ. Chem.* 96, 783–798. <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.957485>
- Makokha, V.A., Qi, Y., Shen, Y., Wang, J., 2016. Concentrations, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the East Dongting and Honghu Lake, China. *Expo. Heal.* 8, 31–41. <https://doi.org/10.1007/s12403-015-0180-8>
- McComb, J., 2014. Understanding Biogeochemical Cycling of Trace Elements and Heavy Metals in Estuarine Ecosystems. *J. Bioremediation Biodegrad.* 05. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000e148>
- Mejdoub, Z., Zaid, Y., Hmimid, F., Kabine, M., 2018. Assessment of metals bioaccumulation and bioavailability in mussels *Mytilus galloprovincialis* exposed to outfalls pollution in coastal areas of Casablanca. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 48, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.018>
- Milinic, J., Lukic, V., Nikolic-Mandic, S., Stojanovic, D., 2008. Concentrations of heavy metals in NPK fertilizers imported in Serbia. *Pestic. i fitomedicina* 23, 195–200. <https://doi.org/10.2298/PIF0803195M>
- Mishra, S., Bharagava, R.N., More, N., Yadav, A., Zainith, S., Mani, S., Chowdhary, P., 2019. *Heavy Metal Contamination : An Alarming Threat to Environment and Human Health.* Springer, Singapore.
- Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Emran, T. Bin, Nainu, F., Khusro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., Simal-Gandara, J., 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *J. King Saud Univ. - Sci.* 34, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- Mohammed, A.S., Kapri, A., Goel, R., 2011. Biomanagement of Metal-Contaminated Soils. *Media* 20, 1–28. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1914-9>

- Mortvedt, J.J., 1996. Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. *Fertil. Res.* 43, 55–61. <https://doi.org/10.1007/BF00747683>
- Muñoz-Vera, A., Peñas Castejón, J.M., García, G., 2016. Patterns of trace element bioaccumulation in jellyfish *Rhizostoma pulmo* (Cnidaria, Scyphozoa) in a Mediterranean coastal lagoon from SE Spain. *Mar. Pollut. Bull.* 110, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.069>
- Nabinger, D.D., Altenhofen, S., Bitencourt, P.E.R., Nery, L.R., Leite, C.E., Vianna, M.R.M.R., Bonan, C.D., 2018. Nickel exposure alters behavioral parameters in larval and adult zebrafish. *Sci. Total Environ.* 624, 1623–1633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.057>
- Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., Sreekanth, T.V.M., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environ. Chem. Lett.* 8, 199–216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2017. Point Source [WWW Document]. URL <https://oceanservice.noaa.gov/education/kits/pollution/03pointsource.html>
- Nawrot, T.S., Staessen, J.A., Roels, H.A., Munters, E., Cuypers, A., Richart, T., Ruttens, A., Smeets, K., Clijsters, H., Vangronsveld, J., 2010. Cadmium exposure in the population: From health risks to strategies of prevention. *BioMetals* 23, 769–782. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9343-z>
- Ngo, H.T.T., Gerstmann, S., Frank, H., 2011. Subchronic effects of environment-like cadmium levels on the bivalve *Anodonta anatina* (Linnaeus 1758): III. effects on carbonic anhydrase activity in relation to calcium metabolism. *Toxicol. Environ. Chem.* 93, 1815–1825. <https://doi.org/10.1080/02772240802503619>

- Nour, H.E., El-Sorogy, A.S., 2017. Distribution and enrichment of heavy metals in Sabratha coastal sediments, Mediterranean Sea, Libya. *J. African Earth Sci.* 134, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.019>
- Nour, H.E.S., 2019. Distribution, ecological risk, and source analysis of heavy metals in recent beach sediments of Sharm El-Sheikh, Egypt. *Environ. Monit. Assess.* 191, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7728-1>
- Nowrouzi, M., Mansouri, B., Nabizadeh, S., Pourkhabbaz, A., 2014. Analysis of heavy metals concentration in water and sediment in the Hara biosphere reserve, southern Iran. *Toxicol. Ind. Health* 30, 64–72. <https://doi.org/10.1177/0748233712451767>
- Nriagu, J.O., Pacyna, J.M., 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* 333, 134–139. <https://doi.org/10.1038/333134a0>
- O'Neill, J.G., 1981. The humoral immune response of *Salmo trutta* L. and *Cyprinus carpio* L. exposed to heavy metals. *J. Fish Biol.* 19, 297–306. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1981.tb05833.x>
- Ogunfowokan, A.O., Oyekunle, J.A.O., Olutona, G.O., Atoyebi, A.O., Lawal, A., 2013. Speciation Study of Heavy Metals in Water and Sediments from Asunle River of the. *Int. J. Environ. Prot.* 3, 6–16.
- Olaifa, F., Olaifa, A., Adelaja, A., Owolabi, A., 2010a. Heavy metal contamination of *Clarias gariepinus* from a lake and fish farm in Ibadan, Nigeria. *African J. Biomed. Res.* 7. <https://doi.org/10.4314/ajbr.v7i3.54185>
- Olaifa, F., Olaifa, A., Onwude, T., 2010b. Lethal and sub-lethal effects of copper to the african catfish (*clarias gariepinus*) juveniles. *African J. Biomed. Res.* 7. <https://doi.org/10.4314/ajbr.v7i2.54071>
- Pachana, K., Wattanakornsiri, A., Nanuam, J., 2010. Heavy Metal Transport and Fate in the Environmental Compartments. *NU Sci. J.* 7, 1–11.

- Pacyna, E.G., Pacyna, J.M., Sundseth, K., Munthe, J., Kindbom, K., Wilson, S., Steenhuisen, F., Maxson, P., 2010. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. *Atmos. Environ.* 44, 2487–2499. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.009>
- Pacyna, J.M., Pacyna, E.G., Aas, W., 2009. Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium. *Atmos. Environ.* 43, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.066>
- Palar, H., 2012. Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. Rineka Cipta, Jakarta.
- Park, J., Kim, S.D., 2020. Derivation of Predicted No Effect Concentrations (PNECs) for Heavy Metals in Freshwater Organisms in Korea Using Species Sensitivity Distributions (SSDs). *Minerals* 10, 697. <https://doi.org/10.3390/min10080697>
- Pragnya, M., Dinesh Kumar, S., Solomon Raju, A.J., Murthy, L.N., 2020. Bioaccumulation of heavy metals in different organs of *Labeo rohita*, *Pangasius hypophthalmus*, and *Katsuwonus pelamis* from Visakhapatnam, India. *Mar. Pollut. Bull.* 157, 111326. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111326>
- Prego, R., Santos-Echeandía, J., Bernárdez, P., Cobelo-García, A., Varela, M., 2013. Trace metals in the NE Atlantic coastal zone of Finisterre (Iberian Peninsula): Terrestrial and marine sources and rates of sedimentation. *J. Mar. Syst.* 126, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.05.008>
- Raab, A., Feldmann, J., 2003. Microbial interaction and transformation of metals and metalloids. *Sci. Prog.* 86, 179–202.
- Raja Sathendra, E., Praveen Kumar, R., Baskar, G., 2018. Microbial Transformation of Heavy Metals. pp. 249–263. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_13)



- Rajaram, R., Ganeshkumar, A., 2019. Anthropogenic Influence of Heavy Metal Pollution on the Southeast Coast of India, Coastal Zone Management. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814350-6.00016-1>
- Rajkowska, M., Protasowicki, M., 2013. Distribution of metals (Fe, Mn, Zn, Cu) in fish tissues in two lakes of different trophic level in Northwestern Poland. *Environ. Monit. Assess.* 185, 3493–3502. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2805-8>
- Rauf, M.A., Ikram, M., Akhter, N., 2002. Analysis of Trace Metals in Industrial Fertilizers. *J. Trace Microprobe Tech.* 20, 79–89. <https://doi.org/10.1081/tma-120002462>
- Rochaddi, B., Atmodjo, W., Satriadi, A., Suryono, C.A., Irwani, I., Widada, S., 2019. The Heavy Metal Contamination in Shallow Groundwater at Coastal Areas of Surabaya East Java Indonesia. *J. Kelaut. Trop.* 22, 69. <https://doi.org/10.14710/jkt.v22i1.4464>
- Roleda, M.Y., Marfaing, H., Desnica, N., Jónsdóttir, R., Skjermo, J., Rebours, C., Nitschke, U., 2019. Variations in polyphenol and heavy metal contents of wild-harvested and cultivated seaweed bulk biomass: Health risk assessment and implication for food applications. *Food Control* 95, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.031>
- Rouane-Hacene, O., Boutiba, Z., Benaissa, M., Belhouari, B., Francour, P., Guibolini-Sabatier, M.E., Faverney, C.R. De, 2018. Seasonal assessment of biological indices, bioaccumulation, and bioavailability of heavy metals in sea urchins *Paracentrotus lividus* from Algerian west coast, applied to environmental monitoring. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 11238–11251. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8946-0>
- RoyChowdhury, A., Datta, R., Sarkar, D., 2017. Heavy Metal Pollution and Remediation, Green Chemistry: An Inclusive Approach. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00015-7>

- Sabbir, W., Zillur Rahman, M., Nuruzzaman Khan, M., Wasim Sabbir, C., Halder, T., Ray, S., 2018. Assessment of heavy metal contamination in fish feed available in three districts of South Western region of Bangladesh. *Int. J. Fish. Aquat. Stud.* 6, 100–104.
- Salem, H.S., Hagrass, A.E., El-Baghdady, H.A.M., El-Naggar, A.M., 2021. Biomarkers of Exposure and Effect in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Environmentally Exposed to Multiple Stressors in Egypt. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 107, 889–894. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03341-1>
- Sarkar, M.M., Rohani, M.F., Hossain, M.A.R., Shahjahan, M., 2022. Evaluation of Heavy Metal Contamination in Some Selected Commercial Fish Feeds Used in Bangladesh. *Biol. Trace Elem. Res.* 200, 844–854. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02692-4>
- Scialabba, N., 1998. Integrated coastal area management and agriculture, forestry and fisheries. FAO Guidelines. Environment and Natural Resources Service, Rome.
- Selvi, A., Rajasekar, A., Theerthagiri, J., Ananthaselvam, A., Sathishkumar, K., Madhavan, J., Rahman, P.K.S.M., 2019. Integrated Remediation Processes Toward Heavy Metal Removal/Recovery From Various Environments-A Review. *Front. Environ. Sci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00066>
- Simionov, I.-A., Cristea, V., Petrea, S.-M., Mogodan, A., Nicoara, M., Baltag, E.S., Strungaru, S.-A., Faggio, C., 2019. Bioconcentration of Essential and Nonessential Elements in Black Sea Turbot (*Psetta Maxima Maeotica* Linnaeus, 1758) in Relation to Fish Gender. *J. Mar. Sci. Eng.* 7, 466. <https://doi.org/10.3390/jmse7120466>
- Simionov, I., Cristea, V., Mogodan, A., Strungaru, S.-A., Petrea, S.-M., Fasola, C.C., Zugravu, G.A., 2019. Heavy metals presence in aquaculture

- ecosystems, in: Soliman, K.S. (Ed.), The 34th International Business Information Management Association Conference.
- Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., Gupta, R., 2011. Heavy metals and living systems: An overview. *Indian J. Pharmacol.* 43, 246–253. <https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>
- Sodrzeieski, P.A., Andrade, L.C. De, Tiecher, T., Camargo, F.A. de O., 2018. Physico-chemical variability and heavy metal pollution of surface sediment in a non-channeled section of Dilúvio Stream (Southern Brazil) and the influence of channeled section in sediment pollution. *Ambient. Agua* 14, 1–13. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Sonone, S.S., Jadhav, S., Sankhla, M.S., Kumar, R., 2020. Water Contamination by Heavy Metals and their Toxic Effect on Aquaculture and Human Health through Food Chain. *Lett. Appl. NanoBioScience* 10, 2148–2166. <https://doi.org/10.33263/LIANBS102.21482166>
- Sorensen, J.C., McCreary, S.T., 1990. Institutional arrangements for managing coastal resources and environments. *Renew. Resour. Inf. Ser. Coast. Manag. Publ.*
- Suresh, G., Ramasamy, V., Sundarrajan, M., Paramasivam, K., 2015. Spatial and vertical distributions of heavy metals and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background-radiation area, Kerala, India. *Mar. Pollut. Bull.* 91, 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.11.007>
- Suryono, C.A., Rochaddi, B., Sabdono, A., Susanti, B.T., 2007. Physico-chemical Characteristics and Heavy Metal Contents in Shallow Groundwater of Semarang Coastal Region. *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.*
- Tabari, S., Saravi, S.S.S., Bandany, G.A., Dehghan, A., Shokrzadeh, M., 2010. Heavy metals (Zn, Pb, Cd and Cr) in fish, water and sediments

- sampled from Southern Caspian Sea, Iran. *Toxicol. Ind. Health* 26, 649–656. <https://doi.org/10.1177/0748233710377777>
- Tahity, T., Islam, M.R.U., Bhuiyan, N.Z., Choudhury, T.R., Yu, J., Noman, M.A., Hosen, M.M., Quraishi, S.B., Paray, B.A., Arai, T., Hossain, M.B., 2022. Heavy Metals Accumulation in Tissues of Wild and Farmed Barramundi from the Northern Bay of Bengal Coast, and Its Estimated Human Health Risks. *Toxics* 10, 410. <https://doi.org/10.3390/toxics10080410>
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J., 2012. Heavy metal toxicity and the environment, in: Luch, A. (Ed.), *Molecular Clinical and Environmental Toxicology*. Springer, Basel, Switzerland, pp. 133–164. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)
- United States Environmental Protection Agency (U.S EPA), 2009. National Recommended Water Quality Criteria. United States Environmental Protection Agency. Office of Water, Office of Science and Technology (4304T).
- US EPA, 2017. Polluted Runoff: Nonpoint Source (NPS) Pollution [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/nps/basic-information-about-nonpoint-source-nps-pollution> (accessed 11.12.19).
- Valavanidis, A., Vlahogianni, T., Dassenakis, M., Scoullou, M., 2006. Molecular biomarkers of oxidative stress in aquatic organisms in relation to toxic environmental pollutants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 64, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.03.013>
- Verry, E.S., Vermette, S.J., 1992. The deposition and fate of trace metals in our environment. <https://doi.org/10.2737/NC-GTR-150>
- Walker, C.H., Sibly, R.M., Hopkin, S.P., Peakall, D.B., 2012. *Principles of ecotoxicology*, 4th ed. CRC Press.

- Wen, X., Lu, J., Wu, J., Lin, Y., Luo, Y., 2019. Influence of coastal groundwater salinization on the distribution and risks of heavy metals. *Sci. Total Environ.* 652, 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.250>
- Westfall, D.G., Mortvedt, J.J., Peterson, G.A., Gangloff, W.J., 2005. Efficient and Environmentally Safe Use of Micronutrients in Agriculture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36, 169–182. <https://doi.org/10.1081/CSS-200043024>
- Wu, B., Song, J., Li, X., 2014a. Linking the toxic metals to benthic community alteration: A case study of ecological status in the Bohai Bay. *Mar. Pollut. Bull.* 83, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.04.010>
- Wu, B., Song, J., Li, X., 2014b. Evaluation of potential relationships between benthic community structure and toxic metals in Laizhou Bay. *Mar. Pollut. Bull.* 87, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.052>
- Xu, L., Yang, W., Jiang, F., Qiao, Y., Yan, Y., An, S., Leng, X., 2018. Effects of reclamation on heavy metal pollution in a coastal wetland reserve. *J. Coast. Conserv.* 22, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0438-8>
- Yadav, H., Kumar, R., Sankhla, M.S., 2020. Residues of Pesticides and Heavy Metals in Crops Resulting in Toxic Effects on Living Organism. *J. seibold Rep.* 15. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24806.65609>
- Yan, X., Liu, M., Zhong, J., Guo, J., Wu, W., 2018. How human activities affect heavy metal contamination of soil and sediment in a long-term reclaimed area of the Liaohe River Delta, North China. *Sustain.* 10, 1–19. <https://doi.org/10.3390/su10020338>
- Yang, X., Yuan, X., Zhang, A., Mao, Y., Li, Q., Zong, H., Wang, L., Li, X., 2015. Spatial distribution and sources of heavy metals and petroleum hydrocarbon in the sand flats of Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea

- of China. *Mar. Pollut. Bull.* 95, 503–512. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.02.042>
- Zhang, Xiaoying, Hu, B.X., Wang, P., Chen, J., Yang, L., Xiao, K., Zhang, Xiaowei, 2018. Hydrogeochemical evolution and heavy metal contamination in groundwater of a reclaimed land on Zhoushan Island. *Water (Switzerland)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10030316>
- Zhao, G., Lu, Q., Ye, S., Yuan, H., Ding, X., Wang, J., 2016. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments of the west Guangdong coastal region, China. *Mar. Pollut. Bull.* 108, 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.057>
- Zhao, Y., Xu, M., Liu, Q., Wang, Z., Zhao, L., Chen, Y., 2018. Study of heavy metal pollution , ecological risk and source apportionment in the surface water and sediments of the Jiangsu coastal region , China : A case study of the Sheyang Estuary. *Mar. Pollut. Bull.* 137, 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.044>
- Zhu, G., Xie, Z., Li, T., Ma, Z., Xu, X., 2017. Assessment ecological risk of heavy metal caused by high-intensity land reclamation in Bohai Bay, China. *PLoS One* 12, 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175627>
- Zhuang, W., Gao, X., 2014. Integrated assessment of heavy metal pollution in the surface sediments of the Laizhou Bay and the coastal waters of the Zhangzi Island, China: Comparison among typical marine sediment quality indices. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094145>

# POLYCHLORINATED BIPHENYL (PCB) DALAM LINGKUNGAN AKUATIK

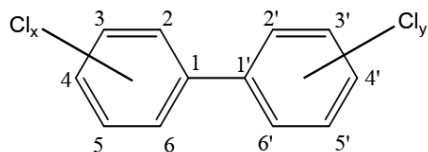
## 3.1 Pendahuluan

Polychlorinated Biphenyl (PCB) merupakan salah satu kontaminan lingkungan yang sering ditemukan dimana-mana dan memiliki sifat persisten. Senyawa ini termasuk dalam kategori kimia organik sintesis terklorinasi dengan biphenyl sebagai dasar strukturnya dan memiliki 209 turunan senyawa dengan karakteristik substitusi *chlorobiphenyls* yang berbeda. Struktur molekul PCB digambarkan pada Gambar 1. Bahan kimia ini masuk dalam bahan kimia yang diprioritaskan peringkat ke-5 setelah As, Pb, Hg, dan Vinil klorida oleh U.S Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) karena sifat toksiknya (ATSDR, 2019). Pada tahun 1970an, produksi PCB dilarang karena sifatnya yang sangat beracun dan termasuk dalam golongan bahan kimia karsinogenik (Lauby-secretan et al., 2015; Markowitz, 2018; Naqvi et al., 2018). PCB dapat larut dalam lemak (lipid), namun sukar larut dalam air. Kelarutan dari PCB dalam air dan larutan organik lain akan mempengaruhi transportasi dan sifat persistensinya di lingkungan dimana kelarutan PCB akan turun ketika derajat klorinasinya meningkat (Islami, 2015).

Bahan toksik ini dapat bertahan lama di lingkungan karena sulit untuk terdegradasi dan terdistribusi di lingkungan dalam berbagai bentuk misalnya

cairan berminyak, padatan/sedimen dan uap di lingkungan (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Jackson et al., 2018; Pelletier et al., 2017; Wood et al., 2016). Pada lingkungan perairan, PCB biasanya terakumulasi pada sedimen yang nantinya akan mempengaruhi ekosistem perairan dalam jangka waktu yang lama. Terakumulasinya PCB dalam sedimen akan mempengaruhi kehidupan hewan bentik terutama hewan dan tumbuhan yang *sessile* seperti kerang, remis dan moluska lainnya (Brázová et al., 2015). Bahaya dari bahan ini adalah potensinya untuk masuk ke dalam rantai makanan dan terjadi bioakumulasi pada manusia (Jackson et al., 2018). Hal ini dapat diakibatkan dari keterikatan PCB dalam partikulat yang tersuspensi dalam perairan sehingga terbioakumulasi dalam tubuh fitoplankton dan zooplankton, sebagai organisme yang berada di dasar rantai makanan. Organisme *bottom feeder* atau organisme perairan lainnya dapat mengadsorpsi PCB dan polutan lainnya sehingga terjadi bioakumulasi PCB dalam rantai makanan (Brázová et al., 2015). Rute pajanan utama dari PCB adalah melalui makanan yang terkontaminasi dimana makanan berlemak (seperti daging, susu, ikan) adalah sumber utamanya (Bu et al., 2015; Jackson et al., 2018; Wood et al., 2016), selain itu PCB juga dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui kontak kulit dan inhalasi (Jackson et al., 2018; Naqvi et al., 2018; Pelletier et al., 2017). Pajanan PCB dapat menimbulkan efek berbahaya pada kesehatan manusia seperti efek reprotoksik, neurotoksik, nefrotoksik, gangguan sistem metabolik dan karsinogenik (Dirinck et al., 2016; Naqvi et al., 2018; Pelletier et al., 2017; Wood et al., 2016). Karena dampaknya yang merugikan baik bagi organisme akuatik dan manusia. Pemantauan PCB di lingkungan perairan menjadi penting untuk dilakukan. Adapun beberapa hewan dapat dijadikan alat biomonitoring PCB diantaranya fitoplankton, makrofita, invertebrata, dan ikan. Pada bab ini akan fokus pada kajian mengenai PCB mulai dari sumber, transportasi PCB dalam perairan, serta toksikokinetik dan toksikodinamik dari PCB dalam tubuh manusia dan dampaknya pada kesehatan manusia dan organisme perairan.





Sumber: Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000

**Gambar 3.1** Struktur kimia Polychlorinated Biphenyl (PCB)

### 3.2 Karakteristik Fisik dan Kimia PCB

PCB merupakan kelompok senyawa kimia dimana 2 – 10 atom klorin tergabung dalam molekul bifenil (Gambar1.)(Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Senyawa ini dapat membentuk 209 senyawa berbeda dengan sifat yang berbeda-beda (*congeners*)(Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Toksisitas biologis PCB dan biodegradasinya berhubungan dengan struktur (Yao et al., 2017). PCB yang memiliki atom klorin lebih banyak memiliki toksisitas yang lebih tinggi dan sulit mengalami biotransformasi (Yao et al., 2017). Keberadaannya di lingkungan dapat ditentukan dengan karakteristik sifat kimia dan fisiknya diantaranya: 1) memiliki kelarutan yang baik pada pelarut non polar, minyak dan lemak (bersifat lipofilik), 2) tekanan uap rendah, 3) non-eksplosif, 4) konduktivitas listrik rendah, 5) konduktivitas termal sangat tinggi, 6) temperatur nyala yang tinggi, 7)memiliki kestabilan yang tinggi, 8) kekentalan meningkat dengan meningkatnya klorin dan ciran berminyak dapat membuatnya berwarna gelap (Beyer and Biziuk, 2009).

PCB non-orto dan mono-orto lebih toksik daripada PCB dengan klorin pada posisi orto pada setiap cincinnya (posisi 2, 2', 6, 6') (Yao et al., 2017). PCB non-orto atau mono-orto masuk dalam kategori PCB koplanar karena ada klorin ada pada posisi 2, 2', 6, 6' yang membentuk konfigurasi planar(Yao et al., 2017). Ada 12 PCB koplanar yang juga disebut sebagai PCB mirip dioksin misalnya 4 PCB non-ortho (PCB 77, 81,126 and 169) and 8 PCB mono-ortho (PCB 105, 114, 118, 123, 156, 157, 167 and 189). PCB mirip dioksin (PCB koplanar) memiliki sifat toksik biologis yang lebih kuat dibandingkan dengan yang bukan golongan PCB mirip dioksin(Yao et al., 2017).

PCB tidak memiliki bau dan rasa, serta warnanya bervariasi dari tidak berwarna sampai kekuningan (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Karena sifatnya yang inert pada suasana asam dan alkali, ultraviolet serta memiliki kestabilan suhu, maka PCB banyak digunakan untuk berbagai keperluan misalnya pendingin dan pelumas pada transformator, kapasitor, dan peralatan listrik lainnya (Jackson et al., 2018; Markowitz, 2018; Pelletier et al., 2017). Senyawa PCB tidak larut dalam air, sebaliknya ia larut dalam pelarut organik non-polar dan lemak (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Jackson et al., 2018). Karena sifat inilah ia berpotensi untuk tersimpan dan terakumulasi dalam jaringan lemak pada manusia.

### 3.3 Nasib PCB di Lingkungan Perairan

PCB menjadi salah satu kontaminan yang sering ditemui di lingkungan biotik maupun abiotik karena berkaitan dengan penggunaannya di industri dan pertanian (Brázová et al., 2015). Produksi PCB diperkenalkan di Amerika dengan nama dagang Arochlor, Askarel dan Thermiol tahun 1929 – 1977. PCB adalah senyawa organik semi-volatil dapat digunakan untuk berbagai keperluan misalnya peralatan kelistrikan (kapasitor, transformator), penyalur panas dan cairan hidrolis, pestisida, cat, tinta, kawat isolator, katalis poliolefin, furnitur, kosmetik, produk pembersih, pelapis logam, produk pembakaran, pengemasan, dll (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Jackson et al., 2018; Pelletier et al., 2017). Penggunaan PCB secara luas mengakibatkan senyawa ini dapat ditemukan dimana-mana. Adapun beberapa cara PCB masuk ke lingkungan diantaranya dengan pembakaran di tempat terbuka (*open burning*) dan pembakaran insenerator yang tidak sempurna, proses pembuatan semen, penguapan dari cat, pelapis, plastik, dan lainnya; saluran pembuangan limbah kota dan industri; tumpahan limbah tak disengaja atau praktik pembuangan limbah yang tidak benar; penggunaan bahan pestisida atau campuran pestisida yang mengandung PCB; pembuangan lumpur limbah, limbah padat kota

dan industri, dan sedimen di laut; lumpur limbah darat; dan migrasi dari lapisan permukaan (misalnya cat) dan bahan pengemas ke dalam makanan dan pakan (Kimbrough et al., 2010; Markowitz, 2018). Transportasi PCB di lingkungan perairan dapat dilihat pada Gambar 2.

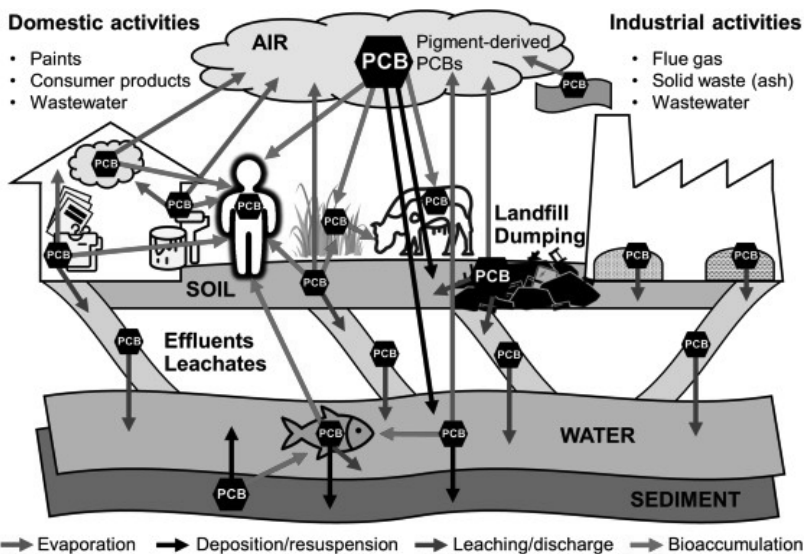
Kontaminasi PCB dalam makanan bervariasi tergantung pada pola turunannya atau *congennya*. Sayuran menyerap PCB yang memiliki *congeners* rendah, sedangkan makanan berlemak (daging, susu, ikan) terkandung PCB dengan *congeners* tinggi (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Misalnya sayuran diketahui memiliki kandungan PCB-28 dengan kadar 78%, dan hanya 0,2% kandungan PCB-180nya, sebaliknya ikan segar memiliki kandungan PCB-28 sebesar 1,2% dan PCB-180 sebesar 27% (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Sumber utama dari PCB pada ekosistem perairan tawar adalah melalui atmosfer. PCB merupakan salah satu bahan kimia yang bersifat volatile (Bremle, 1997).

PCB dapat masuk ke perairan melalui air hujan atau presipitasi. Selain itu, PCB juga masuk ke perairan melalui limpasan permukaan dan pembuangan limbah secara langsung ke perairan. Masuknya PCB ke sungai dapat terbawa sampai ke samudera. Di perairan PCB ada dalam bentuk terlarut dan terserap dalam partikulat. PCB yang memiliki *congener* < 100 menjadi perhatian karena kemampuannya untuk terlarut dalam perairan. Sedangkan PCB yang memiliki *congener* berkisar 292 – 361 memiliki kesukaran untuk larut dalam air (Australian Government Initiative, 2000). Pada ekosistem sungai, PCB ada dalam konsentrasi yang kecil dan transport utamanya ada dalam bentuk terlarut. Hilangnya PCB dalam air dapat diakibatkan karena adanya proses sedimentasi dan volatilisasi PCB ke atmosfer. Pada ekosistem perairan, sedimen juga bertindak sebagai sumber dari PCB karena dapat terresuspensi dalam air.

PCB dapat berpindah pada lingkungan akuatik karena ada kontribusi transportasi atmosferik yang mampu menjangkau wilayah yang luas. Faktor iklim juga menentukan konsentrasi PCB dalam lingkungan perairan. Hal ini diindikasikan dari hasil penelitian yang menyatakan bahwa konsentrasi

PCB dalam organisme akuatik lebih tinggi ketika musim penghujan yang kemungkinan dipengaruhi oleh adanya limpasan permukaan dan resuspensi sedimen di perairan (Pizzini et al., 2017). Mono-, di-, tri-chlorinated PCB seperti aroklor 1221 dan 1232 lebih cepat terbiodegradasi daripada tetra-chlorinated PCB seperti aroklor 1016 dan 1242. Semakin tinggi bifenil terklorinasi seperti 1248, 1254, dan 1260 maka semakin sulit untuk terbiodegradasi (Australian Government Initiative, 2000).

Keberadaan PCB di air minum sangat kecil ( $<1 \mu\text{g/L}$ ) karena sifat lipofiliknya (Kimbrough et al., 2010). Oleh sebab itu, kontribusi pajanan PCB melalui air minum pada tubuh manusia diperkirakan tidak ada atau relatif kecil (Kimbrough et al., 2010). Kontribusi konsumsi ikan yang mengandung PCB pada tubuh manusia cukup besar dengan ditemukan hubungan positif antara konsumsi ikan dengan konsentrasi PCB pada ASI di Swedia (Lignell et al., 2011).



Gambar 3.2 Transportasi PCB dalam ekosistem akuatik (Anh et al., 2021)

## 3.4 Dampak dari kontaminasi PCB pada perairan

### 3.4.1 Dampak Ekologis

Dampak lingkungan akibat PCB difokuskan pada keberadaannya di lingkungan secara global dan akumulasinya pada lemak mamalia laut. PCB dengan struktur ko-planar memiliki toksisitas yang tinggi setara dengan dioksin. Ketika masuk ke dalam tubuh, PCB menjadi lama untuk diekskresikan karena proses eliminasi dalam tubuh menjadi lebih lambat. Hal ini yang menjadikan PCB mudah terakumulasi. Diketahui juga bahwa konsentrasi PCB lebih tinggi ada pada organisme pada tingkat tropik yang tinggi yang mengindikasikan PCB terbiomagnifikasi pada organisme hidup (Brázová et al., 2015). PCB diketahui dapat menghambat pertumbuhan fitoplankton, kerang, tiram dan mengganggu proses metabolic ikan (Reijnders, 1988).

PCB cenderung mudah terbioakumulasi pada jaringan otot dan hati ikan (Brázová et al., 2015). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Brázová et al., (2015) diketahui bahwa total PCB ditemukan lebih banyak pada organ dengan jaringan lemak yang tinggi seperti hati, otot, jaringan adiposa, ginjal, tulang, dan otak. Paparan PCB > 2 mg/kg berkaitan dengan dengan efek kesehatan yang merugikan seperti gangguan reproduksi, histologi, perubahan biokimia dan perubahan populasi pada organisme perairan seperti ikan, amfibi, krustasea, dan moluska (Australian Government Initiative, 2000). Efek toksik PCB dipengaruhi oleh beberapa faktor biologis seperti spesies, umur, ukuran, kondisi fisiologis, dan parasitisme.

Posisi ikan dalam rantai makanan, penggunaan habitat, migrasi, perubahan musim pada habitat dan jumlah lemak dalam tubuh juga berkaitan dengan seberapa banyak PCB mampu terakumulasi dalam jaringan tubuh organisme (Borgå et al., 2004). Diketahui bahwa mamalia perairan memiliki konsentrasi polutan termasuk PCB lebih tinggi dibandingkan organisme darat. Hal ini dikarenakan rantai makanannya lebih panjang, lebih banyak menyimpan lemak, lebih lambat memetabolisasi polutan, dan waktu pajanannya yang lama (Bremle, 1997). Berikut adalah beberapa dampak

dari pajanan PCB pada organisme akuatik : 1) menghambat pertumbuhan spesies alga, 2) mempengaruhi pola keberlanjutan hidup, reproduksi, pertumbuhan, endokrin, fungsi hormone, aktivitas enzim, dan terakumulasi dalam organisme air, 3) dapat menyebabkan kematian pada organisme air (Davies and Anwuri, 2020).

### 3.4.2 Dampak Kesehatan Manusia

Terdapat 209 turunan atau *congener* dari PCB yang terbagi menjadi dua kelompok yaitu kelompok pertama terdiri dari 12 *congener* pertama (PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, dan 189) dan PCB mirip dioksin dimana kedua kelompok tersebut memiliki toksisitas yang sama seperti dioksin seperti imunotoksitas, toksisitas perkembangan, karsinogenesis, neurotoksik (Iniaghe and Kpomah, 2022). Kelompok kedua tidak memiliki sifat toksisitas mirip dioksin tetapi dapat menyebabkan berbagai dampak kesehatan seperti gangguan *neurobehavioral* seperti gangguan fungsi auditoris (PCB 52 dan PCB 180), mengubah perilaku dimorfik seksual (Iniaghe and Kpomah, 2022). Pajanan secara tidak sengaja dan mengonsumsi ikan yang mengandung PCB diketahui dapat mengganggu sistem imun, endokrin dan saraf, terutama pada anak-anak (Faroon et al., 2000; Pinson et al., 2017).

Dampak kesehatan dari pajanan PCB baik yang bersifat akut dan kronis dipengaruhi dosis, durasi pajanan, jenis *congener* PCB, dan derajat klorinasi (Gupta et al., 2017). Gangguan akut terjadi sebagai akibat dari paparan tidak disengaja atau pekerjaan yang berhubungan dengan dosis tinggi dan terjadi dalam waktu singkat. Contohnya pada tahun 1968, di Jepang terjadi keracunan makanan karena adanya kontaminasi minyak dalam beras yang polutannya merupakan polychlorinated biphenyls dan polychlorinated dibenzofurans (Kashima et al., 2011). Penelitian epidemiologi terkait penyakit yang menyebabkan kematian akut dari pajanan PCB diantaranya kanker, diabetes mellitus, penyakit kardiovaskular, pneumonia/bronchitis, kanker paru/bronkus (Kashima et al., 2011).

Risiko kesehatan akibat pajanan PCB pada pekerja lebih tinggi 3.8 kali dibandingkan pada pajanan di populasi penduduk (Wang et al., 2016).

Kasus kematian akibat kanker rektum, kanker payudara, kanker otak, melanoma (Prince et al., 2006), kanker hati dan empedu (Gustavsson and Hogstedt, 1997), tumor misenkimal, malignant lymphoma (Gustavsson et al., 1986), kanker faring, kanker paru-paru (Kimbrough et al., 2014), dilaporkan pada populasi pekerja yang bekerja di pabrik PCB atau pabrik yang menggunakan bahan/peralatan yang mengandung PCB. Meskipun dapat dianggap sebagai efek akut, karena keparahan dan onsetnya yang tiba-tiba, PCB dapat bertahan dari waktu ke waktu mengingat sebagian besar congeners PCB sulit terdegradasi dan dapat terjadi bioakumulasi.

Adanya penyakit akibat paparan PCB juga ditemukan di beberapa sistem organ seperti sistem kardiovaskular dan sirkulasi, sistem pernafasan, sistem endokrin, sistem metabolik, sistem pencernaan, sistem imun, sistem jaringan muskuloskeletal dan jaringan ikat, sistem neurologis dan neurobehavioral, kulit, dan sistem reproduksi (Abass et al., 2013; Bello et al., 2017; D'ERRICO et al., 2012; Dirinck et al., 2016; Errico et al., 2016; Esser et al., 2016, 2015; Fimm et al., 2017; Gaum et al., 2017; Haase et al., 2016; Hopf and Waters, 2015; Kalkunte et al., 2017; Kimáková et al., 2018; Kramer et al., 2012; Kraus et al., 2012; Ledda et al., 2017; Li et al., 2015; Meng et al., 2016; Wahlang, 2018; YAMAMOTO et al., 2015; Yao et al., 2017; Zani et al., 2013; Zheng et al., 2017).

Gangguan akibat pajanan PCB yang berkaitan dengan penyakit hati antara lain kanker hati, non-alcoholic fatty liver (Ledda et al., 2017). Efek genotoksik dari PCB ditunjukkan dengan berbagai mekanisme di antaranya pemecahan DNA, pemendekan telomer, aberasi kromosom, dan ekspresi gen (Callahan et al., 2017; Haase et al., 2016; Ledda et al., 2017; Wang et al., 2018; Zheng et al., 2017). Pemendekan telomer secara terus menerus karena paparan PCB dapat menyebabkan keterbatasan pembaharuan sel dan ekspansi klon limfosit dan leukosit sehingga memperlemah sistem pertahanan tubuh dari penyakit infeksi dan kanker (Callahan et al., 2017; Haase et al., 2016; Scinicariello and Buser, 2015). Jalur genotoksik PCB diperantarai oleh aktivasi NF- $\kappa$ B yang merupakan penyebab inflamasi,

melalui *ataxia telangiectasia mutated* (ATM), kinase teraktivasi oleh kerusakan DNA, dan NF- $\kappa$ B essential modulator (NEMO)(Phillips et al., 2018).

Gangguan terkait sistem neurologis diantaranya disfungsi perkembangan sistem saraf, penyakit neurodegeneratif, kemampuan neurobehavioral, Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD), amyotrophic lateral sclerosis (ALS), autisme, perubahan pada mood, depresi, kemampuan sosial dan perilaku, kognisi, memori, perhatian, kemampuan verbal dan fungsi motorik (Behforooz et al., 2017; Bello et al., 2017; Berghuis et al., 2014; Boucher et al., 2017; Caspersen et al., 2016; Esser et al., 2015; Fimm et al., 2017; Gaum et al., 2017; Mohamad et al., 2015; Nowack et al., 2015; Rodriguez et al., 2018; Vieira et al., 2017). Bayi dan anak-anak adalah kelompok usia yang memiliki kerentanan terhadap gangguan neurologis akibat pajanan PCB. Berdasarkan penelitian cohort didapatkan bahwa pajanan PCB sebelum kelahiran pada ibu berhubungan dengan kasus penurunan fungsi neurologis pada bayi berusia 3 bulan (Berghuis et al., 2014).

Gangguan pada sistem endokrin berhubungan dengan gangguan pada hormon tiroid, hormon pertumbuhan, kortikosteroid (Dirinck et al., 2016; Errico et al., 2016; Haslam et al., 2015; Pencikova et al., 2018; Su et al., 2015). Gangguan pada sistem imun berkaitan dengan disfungsi sel limfoma dan penurunan sel imun seperti monosit, CD4+, TCR  $\alpha\beta$ , leukosit (WBC), total T limfosit (CD3+), neutrofil, sel B(CD19+), sel *natural killer*, imun humoral (IgA, IgM, serum antibodi, IL-2, IL-4, IL-6, IL-10, TNF- $\alpha$ , IFN- $\gamma$ ) (D'ERRICO et al., 2012; Haase et al., 2016; Kramer et al., 2012). PCB juga dikenal sebagai perusak endokrin yang berhubungan dengan penyakit metabolik dan kardiovaskular seperti hipertensi, dislipidemia, infark miokardia, atherosklerosis, rheumatoid arthritis, osteoarthritis, diabetes tipe-2, gestational diabetes mellitus (GDM), peningkatan total kolesterol, trigliserida dan LDL-C (Abella et al., 2016; Bergkvist et al., 2016; Esser et al., 2016; Kimáková et al., 2018; Li et al., 2017; Mullerova et al., 2017; Perkins et al., 2016; Singh and Chan, 2018; Wang et al., 2019; YAMAMOTO et al., 2015; Yang et al., 2017; Zhang et al., 2018). Mekanismenya dapat diperantarai



oleh kerusakan gliserofosfolipid dan ekspresi gen h-ADMSCs pada proses metabolisme lemak (Mullerova et al., 2017; Wang et al., 2019).

PCB juga dapat disalurkan melalui ASI dan plasenta pada janin oleh sebab itu bayi dan janin berisiko untuk mengalami gangguan perkembangan, kecacatan lahir, BBLR, kelahiran prematur, retardasi pertumbuhan intrauterin; bersama dengan beberapa efek laten, seperti kadar hormon tiroid yang terganggu, gangguan reproduksi, penurunan kognitif, perubahan perkembangan persepsi, dan gangguan neurobehavioral (Adetona et al., 2016; Kalkunte et al., 2017; Kobayashi et al., 2017; Li et al., 2015; Naqvi et al., 2018; Tatsuta et al., 2017). Mekanisme toksisitas pada janin dapat dipengaruhi oleh DNA metilasi (Kobayashi et al., 2017). PCB juga dapat mempengaruhi kesehatan ibu saat kehamilan misalnya dengan ditemukannya gestational diabetes mellitus (GDM) (Jaacks et al., 2016; Shapiro et al., 2016; Zhang et al., 2018). Melalui studi *in vitro* ditemukan bahwa PCB merupakan agen anti-angiogenik yang penting pada defisiensi vaskular pada antara ibu-janin dan komplikasi kehamilan lainnya (Kalkunte et al., 2017).

Gangguan pada sistem reproduksi berkaitan dengan perkembangan endometriosis pada wanita (Hu et al., 2018; Huang et al., 2016; Yao et al., 2017), kanker prostat dan penurunan kualitas sperma (pergerakan dan kemampuan fertilitas sperma) pada pria, keterlambatan kematangan seksual, aneuploid sperma (Ali et al., 2016; Burns et al., 2016; Hsu et al., 2016; Jiang et al., 2017; Petersen et al., 2018; Ruder et al., 2017). Pembentukan pembenturan hormon sex hormone-binding globulin (SHBG) dan luteinizing hormone (LH) mempengaruhi produksi testosteron pada pria (Petersen et al., 2018). Gangguan sistem pernafasan pada anak-anak seperti asma dilaporkan pada penelitian Meng *et al.*, 2016 berkaitan dengan pajanan PCB. Gangguan kesehatan lainnya dapat ditemukan pada kulit yaitu terjadi millia, komedo, pigmentasi kulit, hiperkeratosis, akantosis pada epidermis kulit, melanoma (Akahane et al., 2017; Donat-vargas et al., 2017; Kimáková et al., 2018; Mitoma et al., 2015), disfungsi koklea (Moleti et al., 2018), nefropati (Everett and Thompson, 2016), kanker payudara (Zimeri et al., 2015)

### 3.5 Toksikokinetik dan Toksikodinamik PCB

PCB dapat terabsorpsi pada tubuh manusia melalui ingesti, inhalasi, kontak dermal/kulit, pajanan dari ibu ke bayi melalui plasenta (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Jackson et al., 2018; Markowitz, 2018; Naqvi et al., 2018; Pelletier et al., 2017). Jalur utama pajanannya adalah melalui makanan atau ingesti karenanya ada potensi untuk terjadi bioakumulasi pada rantai makanan (Bu et al., 2015). Pada penelitian dengan menggunakan percobaan pada hewan, diketahui bahwa PCB terabsorpsi lebih baik pada saluran pencernaan dibandingkan dengan absorpsi melalui kulit (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Pada saluran pencernaan, PCB akan terserap melalui difusi pasif. Absorpsi PCB paling baik terjadi pada pada usus daripada di serum lipid (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Jackson et al., 2018).

Pengangkut utama PCB di plasma manusia adalah lipoprotein. Karena sifat PCB adalah lipofilik, maka ia akan tersimpan pada jaringan memiliki banyak lemak (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Jackson et al., 2018; Ruiz et al., 2014). PCB biasanya tersimpan dan ditemukan pada jaringan hati, otak, jaringan lemak (adiposa), serum, plasma, darah, kulit, otot, ginjal (Abass et al., 2013) plasenta dan ASI (Adetona et al., 2016; Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Kania-Korwel et al., 2015; Moon et al., 2011; Naqvi et al., 2018). Perbedaan pada sifat ADME masing-masing *congeners* PCB ditentukan oleh jumlah PCB tersebut dalam kompartemen tubuh (Abass et al., 2013). Misalnya pada penelitian dengan hewan percobaan dari Kania-Korwel *et al.*, 2016 didapatkan bahwa PCB akan lebih banyak tersimpan pada jaringan adiposa dibanding dengan hati, otak, darah. ASI dan plasenta dapat mengakumulasi PCB oleh sebab itu janin dan bayi dapat terpajan oleh PCB dari ibunya (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Lignell et al., 2009; Naqvi et al., 2018).

Sifatnya yang inert menjadikan PCB sangat lambat dimetabolisme oleh tubuh manusia (Dirinck et al., 2016; Ruiz et al., 2014). Seperti bahan toksik lainnya, untuk menimbulkan dampak PCB juga dipengaruhi oleh konsentrasi, frekuensi pajanan dan durasi pajanan (Abass et al., 2013). Pengikatan PCB dengan *aromatic hydrocarbon receptor* atau AhR adalah mekanisme toksik utama pada PCB yang dimetabolisme sel di berbagai organ (Abass et al., 2013; Ruiz et al., 2014). Penginduksian AhR oleh PCB menyebabkan reseptor tersebut kehilangan protein pendamping dan mengikat senyawa PCB (Ruiz et al., 2014). Setelah pengikatan ligan, AhR mentranslokasi ke nukleus dan berikatan dengan transkriptor inti AhR (ARNT). Dimer AhR-ARNT dapat mengaktifkan transkripsi kode target gen untuk enzim metabolisme xenobiotik (CYP1A1, CYP1A2, CYP2B1, dll.) atau mengontrol respons seluler yang kompleks seperti perkembangan siklus sel dan apoptosis (Ruiz et al., 2014). Afinitas yang tinggi dari bahan kimia seperti dioksin (*dioxin like chemical* atau DLC) untuk berikatan dengan reseptor AhR menimbulkan dampak toksik yang tinggi juga pada manusia (Ruiz et al., 2014).

Aktivasi AhR memainkan peran penting juga dalam jalur perkembangan seperti hematopoiesis dan diferensiasi, selain itu terkait juga dengan jalur siklus sel, proliferasi sel dan karsinogenesis (Wahlang, 2018). AhR dapat melakukan cross-talk dengan reseptor estrogen yang menghasilkan proses anti-estrogenik, serta upregulasi sitokin inflamasi seperti interleukin, pembentukan spesies oksigen reaktif (ROS), dan induksi enzim antioksidan yang semuanya mendahului stres oksidatif dan kerusakan jaringan (Wahlang, 2018). Reseptor xenobiotik yang juga terlibat dalam mekanisme toksik PCB antara lain *pregnane-xenobiotic receptor* (PXR) dan *constitutive androstane receptor* (CAR) (Wahlang, 2018). PCB juga dapat mengaktifkan reseptor endobiotik seperti peroxisome proliferator-activated receptors (PPARs) and the farnesoid-X-receptor (FXR) (Gupta et al., 2017; Wahlang, 2018). Mekanisme toksisitas dari PCB dapat dilihat pada Gambar 4.

PCB perlu dibiotransformasi menjadi senyawa yang lebih polar sebelum diekskresikan dari tubuh (Megson et al., 2013). Ada dua mekanisme biotransformasi PCB pada biota yaitu hydroxylated polychlorinated

biphenyls (OH-PCBs) and methylsulfonyl-PCBs (MeSO<sub>2</sub>-PCBs)(Yao et al., 2017). Pada proses metabolismenya melibatkan 3 enzim utama yaitu sitokrom P-450 (CYP1A1,1A2, and CYP2B1/2B2) yang memediasi oksidasi arene oksida untuk proses biotransformasi selanjutnya (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Enzim tersebut tidak hanya diinduksi oleh keberadaan PCB tetapi juga oleh kondisi lingkungan dan pola diet seseorang dimana CYP1A dapat diinduksi oleh PAH dan asupan sayuran persilangan (Megson et al., 2013). Jalur metabolik digunakan untuk memproduksi senyawa turunan yang larut di air termasuk hidroksilasi atau pembentukan epoksida diikuti fase II konjugasi enzimatik(Megson et al., 2013).

Tidak semua PCB dibiobiotransformasi dengan cara dan laju yang sama karena dipengaruhi oleh jumlah dan posisi atom klorin dalam molekul(Grimm et al., 2015; Megson et al., 2013). Atom karbon pada posisi *meta* dan *para* adalah tempat yang cocok untuk oksidasi(Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Hidroksilasi PCB koplantar biasanya terjadi pada posisi *para* dalam cincin fenil terklorinasi yang paling sedikit, dan laju metabolisme umumnya turun dengan meningkatnya substitusi klorin (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Sebaliknya PCB non-planar mengalami hidroksilasi dengan posisi *meta*. Sifat persisten PCB ditentukan oleh bobot molekul, pola substitusi, perputaran ikatan fenil-fenil, dan jarak intramolekul yang ditentukan oleh gaya nonelektrostatik (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000)

Fase pertama dari proses biotransformasi PCB dimediasi oleh sitokrom P450 monooksigenase isozim yang menghasilkan senyawa PCB hidroksilasi (OH-PCBs) dimana senyawa ini sangat persisten dan lambat dieliminasi tubuh (Dirinck et al., 2016; Grimm et al., 2015; Kania-Korwel et al., 2015). PCB koplantar atau PCB mirip dioksin dimetabolisme oleh isozim sitokrom P450 1A (CYP1A), sedangkan isozim sitokrom P450 2B (CYP2B) yang mengubah sebagian besar PCB (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Grimm et al., 2015; Megson et al., 2013). Mono-ortho PCB

menginduksi isozim CYP1A dan CYP2B (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Produksi dihidrooksilasi berkaitan dengan pembentukan stres oksidatif tubuh (Grimm et al., 2015). OH-PCB juga dapat melakukan reaksi konjugasi yang dikatalisis oleh sulfotransferases (SULTs) atau UDP-glucuronosyl transferases (UGTs) untuk menghasilkan konjugat sulfat atau asam glukuronat (Grimm et al., 2015). Inisiasi CYP-dependent monooxygenasi dengan PCB congener dapat menghasilkan arena oksida (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Grimm et al., 2015).

OH-PCB paling mudah dibentuk dari PCB dengan 2,3, 2,5- dan 2,6-diklorinasi atau 2,3,6-pola triklorinasi atau epoksida PCB karena cincin fenil tidak memiliki atau lebih sedikit jumlah atom klorin substituen dalam posisi apa pun kecuali posisi 4 (Grimm et al., 2015). PCB congener dengan substitusi klorin 4-, 3,4-, 3,5-, 2,4,5-, 2,3,4,6- atau 2,3,5,6- kurang efisien dimetabolisme dan cenderung membentuk epoksida antara karbon tersubstitusi klorin dengan karbon yang tidak tersubstitusi (Grimm et al., 2015). Epoksida PCB dapat bereaksi dengan glutathione (GSH) untuk membentuk metabolit PCB yang dihydro-glutathione-hidroksil yang dapat membentuk konjugat glutathione PCB melalui hilangnya air (Grimm et al., 2015). Pembentukan konjugat ini dapat membentuk asam merkapturat (Grimm et al., 2015).

Mayoritas OH-PCB bertahan dan berikatan dengan darah dan protein sehingga berpotensi menimbulkan dampak kesehatan (Dirinck et al., 2016). Rute ekskresi utama dari PCB melalui feses dan khusus untuk metabolitnya bisa ditemukan di urin, empedu dan sebagian kecil ada di feses (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Mayoritas PCB sulit untuk di metabolisme dan akan tetap berada dalam tubuh untuk waktu yang sangat lama (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000; Dirinck et al., 2016). Beberapa model dapat digunakan untuk mengidentifikasi pajanan dan penyimpanan bahan kimia untuk dideskripsikan secara kuantitatif pada proses biologis misalnya dengan model Physiologically Based Pharmacokinetic (PBPK)/Pharmacodynamic

(PD) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000). Gambar 3. adalah model PBPK dari pajanan PCB. Selain itu ada model CADM (Concentration-and Age-Dependent Model) dari penelitian Ruiz, Aylward and Mumtaz, tahun 2014 yang digunakan untuk simulasi pajanan oral POPs melalui diet, air, dan proses menyusui.

### 3.5.1 Mekanisme Toksisitas PCB

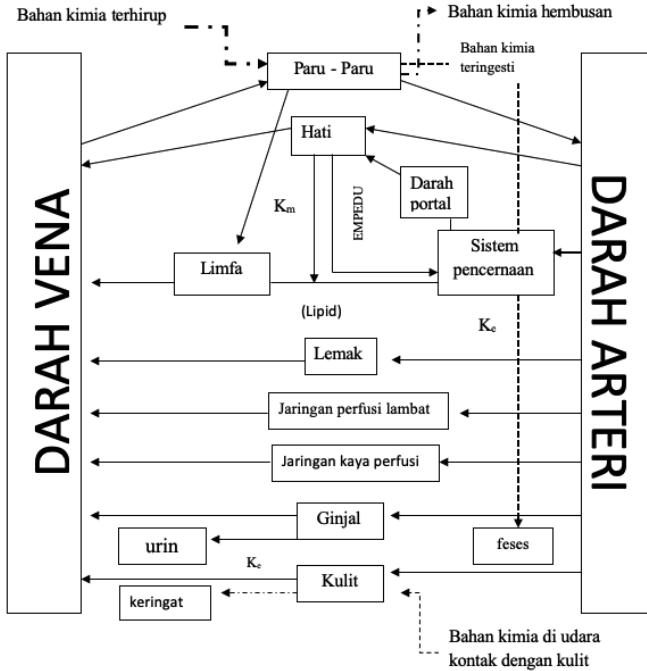
Mekanisme toksisitas PCB tergantung pada strukturnya dimana PCB koplanar atau PCB mirip doksina akan mengaktifkan jalur metabolisme AhR yang mengaktifkan respon inflamasi dan produksi stres oksidatif pada tubuh, sedangkan PCB non-koplanar akan mengaktifkan jalur metabolisme pregnane xenobiotic receptor (PXR) dan constitutive androstane receptor (CAR) yang berefek pada proses metabolik seperti NAFLD/NASH, gangguan metabolisme energi, dan obesitas, dan kerusakan neutrofil (Berntsen et al., 2016; Gupta et al., 2017). Mekanisme dari AhR menghasilkan ekspresi gen yang berkaitan dengan karsinogenesis melalui deregulasi beberapa siklus sel dan jalur transduksi sinyal (Callahan et al., 2017). Mekanisme toksisitas lainnya yang diinduksi oleh PCB meliputi perubahan microRNA, gangguan dengan pensinyalan faktor pertumbuhan epidermal (EGFR), DNA metilasi, efek genotoksik, supresi imun, respons inflamasi, gangguan endokrin (Callahan et al., 2017; Gupta et al., 2017; Kobayashi et al., 2017; Mullerova et al., 2017).

Metabolisme PCB dalam tubuh menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) yang dapat menginduksi stres oksidatif sehingga terjadi serangan pada jaringan lemak, DNA dan protein. Peningkatan kadar ROS dalam tubuh diperantarai oleh sitokrom 450 dan NADPH oksidase (Li et al., 2017). Selain itu, ROS juga berkaitan dengan proses apoptosis yang mengakibatkan kematian pada sel (Xu et al., 2014). Pada penelitian yang dilakukan Xu dkk (2014) diketahui bahwa terjadi kematian sel hati melalui perantara apoptosis yang diinduksi dari peningkatan produksi ROS, lipid peroksida dan penurunan aktivitas antioksidan glutathione S-transferase pada sel HepG2 (Xu et al., 2014). Kematian sel akibat apoptosis dan nekrosis yang diinduksi

oleh PCB juga berkaitan dengan penyakit kardiovaskular dan gangguan neurologis (Guida et al., 2017; Li et al., 2017)

### 3.6 Simpulan

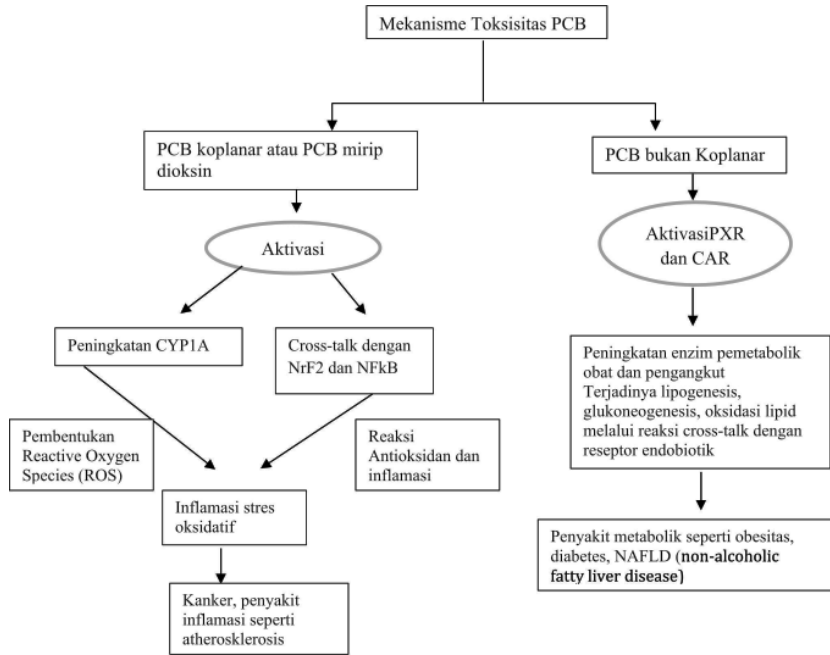
PCB merupakan salah satu polutan di lingkungan perairan yang mampu bertahan lama sehingga berpotensi untuk terakumulasi dan terbiomagnifikasi pada organisme perairan. Terakumulasinya PCB dalam organisme perairan berpotensi untuk memajan dan menimbulkan efek yang membahayakan bagi manusia karena peredaran PCB dapat melalui rantai makanan. Organisme dengan tingkat tropik tinggi seperti manusia dan mamalia air mampu mengakumulasi PCB dalam jumlah yang besar. PCB adalah bahan kimia yang berbahaya bagi manusia dimana dampak yang ditimbulkannya ditemukan pada berbagai sistem organ. Konsep toksikokinetik dan toksikodinamik memberikan gambaran mengenai perjalanan PCB dalam tubuh dan efek dari interaksi PCB pada sel, jaringan dan organ. Diketahui pula bahwa ada tidak semua jenis PCB dapat dimetabolisme dan diekskresikan. Bahkan ada beberapa diantaranya yang menetap dalam jaringan lemak dalam jangka waktu yang lama.



$K_m$ :  $K_m$  (konstanta metabolisme)  $K_e$  (Konstanta Eliminasi)

**Gambar 3.3** Model Physiologically Based Pharmacokinetic (PBPK) untuk PCB Adaptasi dari Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000





Sumber: (Gupta et al., 2017)

**Gambar 3.4** Mekanisme Toksisitas PCB pada Tubuh

## Daftar Pustaka

- Abass, K., Huusko, A., Nieminen, P., Myllynen, P., Pelkonen, O., Vahakangas, K., Rautio, A., 2013. Estimation of health risk by using toxicokinetic modelling : A case study of polychlorinated biphenyl PCB153. *J. Hazard. Mater.* 261, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.011>
- Abella, V., Pérez, T., Scotece, M., Conde, J., Pirozzi, C., Pino, J., Lago, F., González-gay, M.Á., Mera, A., Gómez, R., Gualillo, O., 2016. Pollutants make rheumatic diseases worse : Facts on polychlorinated biphenyls ( PCBs ) exposure and rheumatic diseases. *Life Sci.* 157, 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2016.06.010>

- Adetona, O., Horton, K., Sjodin, A., Jones, R., Hall, D.B., Aguillarvillalobos, M., Cassidy, B.E., Vena, J.E., Needham, L.L., Naeher, L.P., 2016. Concentrations of select persistent organic pollutants across pregnancy trimesters in maternal and in cord serum in Trujillo, Peru. *Chemosphere* 91, 1426–1433. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.043>. Concentrations
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 2000. Toxicological Profile for Polychlorinated Biphenyl (PCBs).
- Akahane, M., Matsumoto, S., Kanagawa, Y., Mitoma, C., Uchi, H., 2017. Long - Term Health Effects of PCBs and Related Compounds : A Comparative Analysis of Patients Suffering from Yusho and the General Population. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* <https://doi.org/10.1007/s00244-017-0486-6>
- Ali, I., Julin, B., Glynn, A., Högberg, J., Berglund, M., Johansson, J., Andersson, S., Andrén, O., Giovannucci, E., Wolk, A., Stenius, U., Åkesson, A., 2016. Exposure to polychlorinated biphenyls and prostate cancer : population-based prospective cohort and experimental studies. *Carcinogenesis* 37, 1144–1151. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgw105>
- Anh, H.Q., Watanabe, I., Minh, T.B., Takahashi, S., 2021. Unintentionally produced polychlorinated biphenyls in pigments: An updated review on their formation, emission sources, contamination status, and toxic effects. *Sci. Total Environ.* 755, 142504. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142504>
- ATSDR, 2019. ATSDR's Substance Priority List [WWW Document]. URL <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html> (accessed 12.25.20).
- Australian Government Initiative, 2000. Polychlorinated biphenyls in freshwater and marine water [WWW Document]. Guidel. Fresh Mar. Water Qual.

- Behforooz, B., Newman, J., Gallo, M. V, Schell, L.M., Nation, M., 2017. PCBs and Measures of Attention and Impulsivity on a Continuous Performance Task of Young Adults. *Neurotoxicol Teratol* 7509, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2017.08.004>. PCBs
- Bello, A., Woskie, S.R., Gore, R., Dale, P., 2017. Retrospective Assessment of Occupational Exposures for the GENEVA Study of ALS among Military Veterans. *Ann. Work Expo. Heal.* 61, 299–310. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxw028>
- Berghuis, S.A., Soechitram, S.D., Sauer, P.J.J., Bos, A.F., 2014. Prenatal Exposure to Polychlorinated Biphenyls and Their Hydroxylated Metabolites is Associated with Neurological Functioning in 3-Month-Old Infants. *Toxicol. Sci.* 142, 455–462. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfu196>
- Bergkvist, C., Berglund, M., Glynn, A., Julin, B., Wolk, A., Åkesson, A., 2016. Dietary exposure to polychlorinated biphenyls and risk of myocardial infarction in men – A population-based prospective cohort study. *Environ. Int.* 88, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.020>
- Berntsen, H.F., Fonnum, F., Walaas, S.I., Bogen, I.L., 2016. Low-Chlorinated Non-Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls Present in Blood and Breast Milk Induce Higher Levels of Reactive Oxygen Species in Neutrophil Granulocytes than High-Chlorinated Congeners. <https://doi.org/10.1111/bcpt.12620>
- Beyer, A., Biziuk, M., 2009. Environmental Fate and Global Distribution of Polychlorinated Biphenyls. pp. 137–158. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0032-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0032-6_5)
- Borgå, K., Fisk, A.T., Hoekstra, P.F., Muir, D.C.G., 2004. BIOLOGICAL AND CHEMICAL FACTORS OF IMPORTANCE IN THE BIOACCUMULATION AND TROPHIC TRANSFER OF PERSISTENT ORGANOCHLORINE CONTAMINANTS IN ARCTIC

- MARINE FOOD WEBS. *Environ. Toxicol. Chem.* 23, 2367. <https://doi.org/10.1897/03-518>
- Boucher, O., Muckle, G., Ayotte, P., Dewailly, E., Jacobson, S.W., Jacobson, J.L., Neurosciences, B., 2017. Altered Fine Motor Function at School Age in Inuit Children Exposed to PCBs, Methylmercury, and Lead. *Environ. Int.* 95, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.08.010>.  
Altered
- Břázová, T., Hanzelová, V., Šalamún, P., 2015. Ecological Risk and Distribution of Polychlorinated Biphenyls in Fish, in: *Emerging Pollutants in the Environment - Current and Further Implications*. InTech, p. 13. <https://doi.org/10.5772/60405>
- Bremle, G., 1997. Polychlorinated biphenyls (PCB) in a river ecosystem. Lund University, Lund.
- Bu, Q., Macleod, M., Wong, F., Toms, L.L., Mueller, J.F., Yu, G., 2015. Historical intake and elimination of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides by the Australian population reconstructed from biomonitoring data. *Environ. Int.* 74, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.014>
- Burns, J.S., Lee, M.M., Williams, P.L., Korrick, S.A., Sergeev, O., Lam, T., 2016. Associations of Peripubertal Serum Dioxin and Polychlorinated Biphenyl Concentrations with Pubertal Timing among Russian Boys. *Environ. Heal. Perspectives* 124, 1801–1807.
- Callahan, C.L., Pavuk, M., Birnbaum, L.S., Ren, X., Olson, J.R., Bonner, M.R., 2017. Serum Polychlorinated Biphenyls and Leukocyte Telomere Length in a Highly-Exposed Population: The Anniston Community Health Survey. *Environ. Int.* 108, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.018>.Serum
- Caspersen, I.H., Aase, H., Biele, G., Brantsæter, A.L., Haugen, M., Kvale, H.E., Skogan, A.H., Zeiner, P., Alexander, J., Meltzer, H.M., Knutsen,

- H.K., 2016. The influence of maternal dietary exposure to dioxins and PCBs during pregnancy on ADHD symptoms and cognitive functions in Norwegian preschool children. *Environ. Int.* 94, 649–660. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.06.033>
- D'ERRICO, M.N., TULLIO, G. DE, GIOACCHINO, M. DI, LOVREGLIO, P., BASSOI, A., DRAGOI, I., SERRAI, R., APOSTOLI, P., VACCA, A., SOLEO, L., 2012. Immune effects of polychlorinated biphenyls, smoking and alcohol. *Int. J. Immunopathol. Pharmacol.* 25, 1041–1054. <https://doi.org/10.1177/039463201202500421>
- Davies, O., Anwuri, P., 2020. Polychlorinated Biphenyls Contamination in Aquatic Organisms in Nigerian Inland Waters. *Int. J. Res. Stud. Sci. Eng. Technol.* 7, 1–8.
- Dirinck, E., Dirtu, A.C., Malarvannan, G., Covaci, A., Jorens, P.G., Gaal, L.F. Van, 2016. A Preliminary Link between Hydroxylated Metabolites of Polychlorinated Biphenyls and Free Thyroxin in Humans. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph13040421>
- Donat-vargas, C., Berglund, M., Glynn, A., Wolk, A., Agneta, A., 2017. Dietary polychlorinated biphenyls, long-chain n-3 polyunsaturated fatty acids and incidence of malignant melanoma. *Eur. J. Cancer* 72, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2016.11.016>
- Errico, M.N.D., Lovreglio, P., Drago, I., Apostoli, P., Soleo, L., 2016. Influence of Occupational and Environmental Exposure to Low Concentrations of Polychlorobiphenyls and a Smoking Habit on the Urinary Excretion of Corticosteroid Hormones. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph13040360>
- Esser, A., Gaum, P.M., Schettgen, T., Kraus, T., Gube, M., Lang, J., 2015. Effect of Occupational Polychlorinated Biphenyls Exposure on Quality-Adjusted Life Years Over Time at the HELPCB Surveillance Program.

- J. Toxicol. Environ. Health 78, 37–41. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.946165>
- Esser, A., Schettgen, T., Gube, M., Koch, A., Kraus, T., 2016. Association between polychlorinated biphenyls and diabetes mellitus in the German HELPCB cohort. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 219, 557–565. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.06.001>
- Everett, C.J., Thompson, O.M., 2016. Association of dioxins , furans and dioxin-like PCBs in human blood with nephropathy among US teens and young adults. *Rev Env. Heal.* 1–7. <https://doi.org/10.1515/reveh-2015-0031>
- Faroon, O., Jones, D., De Rosa, C., 2000. Effects of polychlorinated biphenyls on the nervous system. *Toxicol. Ind. Health* 16, 305–333. <https://doi.org/10.1177/074823370001600708>
- Fimm, B., Sturm, W., Esser, A., Schettgen, T., Willmes, K., Lang, J., Gaum, P.M., Kraus, T., 2017. NeuroToxicology Neuropsychological effects of occupational exposure to polychlorinated biphenyls. *Neurotoxicology* 63, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.09.011>
- Gaum, P.M., Gube, M., Schettgen, T., Putschögl, F.M., Kraus, T., Fimm, B., Lang, J., 2017. Polychlorinated biphenyls and depression : cross-sectional and longitudinal investigation of a dopamine-related Neurochemical path in the German HELPCB surveillance program. *environmental Heal.* 16, 106. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0316-3>
- Grimm, F., Hu, D., Kania-Korwel, I., Lehmler, H., Ludewig, G., Hornbuckle, K., Duffel, M., Bergman, A., Robertson, L., 2015. Metabolism and metabolites of polychlorinated biphenyls (PCBs). *Crit Rev Toxicol* 45, 245–272. <https://doi.org/10.3109/10408444.2014.999365>.Metabolism
- Guida, N., Laudati, G., Serani, A., Mascolo, L., Montuori, P., Renzo, G. Di, Canzoniero, L.M.T., 2017. The Neurotoxicant PCB-95 By Increasing

- the Neuronal Transcriptional Repressor REST Down-Regulates Caspase-8 and Increases Ripk1, Ripk3 and M1k1 Expression Determining Necroptotic Neuronal Death. *Biochem. Pharmacol.* <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2017.06.135>
- Gupta, P., Thompson, B.L., Wahlang, B., Jordan, C.T., Hilt, J.Z., Hennig, B., Dziubla, T., 2017. The environmental pollutant , polychlorinated biphenyls , and cardiovascular disease : a potential target for antioxidant nanotherapeutics. *Drug Deliv. Transl. Res.* <https://doi.org/10.1007/s13346-017-0429-9>
- Gustavsson, P., Hogstedt, C., 1997. A Cohort Study of Swedish Capacitor Manufacturing Workers Exposed to Polychlorinated Biphenyls ( PCBs ) 239, 234–239.
- Gustavsson, P., Hogstedt, C., Rappe, C., 1986. Short-Term Mortality and Cancer Incidence in Capacitor Manufacturing Workers Exposed to Polychlorinated Biphenyls ( PCBs ) 344, 341–344.
- Haase, H., Fahlenkamp, A., Schettgen, T., Esser, A., Gube, M., Ziegler, P., Kraus, T., Rink, L., 2016. Immunotoxicity Monitoring in a Population Exposed to Polychlorinated Biphenyls. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph13030295>
- Haslam, A., Robb, S.W., Bonner, M.R., Lindblad, W., Allegra, J., Shen, Y., Vena, J.E., 2015. Polychlorinated biphenyls and omega-3 fatty acid exposure from fish consumption , and thyroid cancer among New York anglers. *JES* 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.05.004>
- Hopf, N.B., Waters, M.A., 2015. Historical reconstruction of polychlorinated biphenyl (PCB) exposures for workers in a capacitor manufacturing plant. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 21, 6419–6433. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1590-4>. Historical
- Hsu, P., Li, M., Lee, Y., Kuo, P., Leon, Y., 2016. Polychlorinated biphenyls and dibenzofurans increased abnormal sperm morphology without

- alterations in aneuploidy : The Yucheng study. *Chemosphere* 165, 294–297. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.035>
- Hu, A.T., Yao, M., Fu, X., 2018. Polychlorinated biphenyl 104 promotes migration of endometrial. *Toxicol. Lett.* <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.03.009>
- Huang, Q., Chen, Y., Chen, Q., Zhang, H., Lin, Y., 2016. Dioxin - like rather than non - dioxin - like PCBs promote the development of endometriosis through stimulation of endocrine – inflammation interactions. *Arch. Toxicol.* <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1854-0>
- Iniaghe, P.O., Kpomah, E.D., 2022. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in water and sediments from the Udu River, Niger Delta, Nigeria: concentration, distribution and risk assessment. *J. Environ. Expo. Assess.* 1, 20. <https://doi.org/10.20517/jeea.2022.19>
- Islami, M.M., 2015. Efek akumulasi Polychlorinated biphenyls (PCB) pada sedimen perairan terhadap bivalvia. *Oseana XL*, 22–30.
- Jaacks, L.M., Barr, D.B., Sundaram, R., Maisog, J.M., Zhang, C., Louis, G.M.B., 2016. Pre-pregnancy maternal exposure to polybrominated and polychlorinated biphenyls and gestational diabetes : a prospective cohort study. *Environ. Heal.* 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0092-5>
- Jackson, E., Shoemaker, R., Larian, N., Cassis, L., 2018. Adipose Tissue as a Site of Toxin Accumulation. *Compr Physiol* 7, 1085–1135. <https://doi.org/10.1002/cphy.c160038>.Adipose
- Jiang, L.G., Cheng, L.Y., Kong, S.H., Yang, Y., Shen, Y.J., Chen, C., Deng, X.H., 2017. Toxic effects of polychlorinated biphenyls ( Aroclor 1254 ) on human sperm motility. *Asian J. Androl.* 19, 561–566. <https://doi.org/10.4103/1008-682X.186876>
- Kalkunte, S., Huang, Z., Lippe, E., Kumar, S., Robertson, L.W., 2017. Polychlorinated biphenyls target Notch / Dll and VEGF R2 in the



- mouse placenta and human trophoblast cell lines for their anti-angiogenic effects. *Nat. Publ. Gr.* 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep39885>
- Kania-Korwel, I., Barnhart, C.D., Lein, P.J., Lehmler, H.-J., 2015. EFFECT OF PREGNANCY ON THE DISPOSITION OF 2,2',3,5',6-PENTACHLOROBIPHENYL (PCB 95) ATROPISOMERS AND THEIR HYDROXYLATED METABOLITES IN FEMALE MICE. *Chem Res Toxicol* 28, 1774–1783. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.5b00241>.EFFECT
- Kashima, S., Yorifuji, T., Tsuda, T., 2011. Acute non-cancer mortality excess after polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzofurans mixed exposure from contaminated rice oil : Yusho. *Sci. Total Environ.* 409, 3288–3294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.038>
- Kimáková, T., Nevolná, Z., Vašková, J., Bencko, V., 2018. Retrospective assessment of specific effects of exposure of workers to PCBs in Slovakia 25, 421–427. <https://doi.org/10.26444/aaem/86307>
- Kimbrough, R.D., Krouskas, C.A., Carson, M.L., Long, T.F., Bevan, C., Tardiff, R.G., 2010. Human uptake of persistent chemicals from contaminated soil : PCDD / Fs and PCBs. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 57, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2009.12.005>
- Kimbrough, R.D., Krouskas, C.A., Xu, W., Shields, P.G., 2014. Mortality among capacitor workers exposed to polychlorinated biphenyls ( PCBs ), a long-term update. *Int Arch Occup Env. Heal.* <https://doi.org/10.1007/s00420-014-0940-y>
- Kobayashi, Sumitaka, Sata, F., Miyashita, C., Miura, R., Azumi, K., Kobayashi, Sachiko, Goudarzi, H., Araki, A., Ishizuka, M., Todaka, T., Kajiwara, J., Hori, T., Kishi, R., 2017. Gender-specific association of exposure to non-dioxin-like polychlorinated biphenyls during pregnancy with methylation levels of H19 and long interspersed nuclear element-1

- in cord blood in the Hokkaido study. *Toxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.08.010>
- Kramer, S., Hikel, S.M., Adams, K., Hinds, D., Moon, K., 2012. Current Status of the Epidemiologic Evidence Linking Polychlorinated Biphenyls and Non-Hodgkin Lymphoma , and the Role of Immune Dysregulation. *Environ. Heal. Perspectives* 120, 1067–1075.
- Kraus, T., Gube, M., Lang, J., Esser, A., Sturm, W., Willmes, K., Neulen, J., Baron, J.M., Merk, H., Konrad, K., Deisz, S., Rink, L., Hagmann, M., 2012. Surveillance Program for Former PCB-Exposed Workers of a Transformer and Capacitor Recycling Company , Family Members , Employees of Surrounding Companies , and Area Residents — Executive Summary. *J. Toxicol. Environ. Health* 75, 1241–1247. <https://doi.org/10.1080/15287394.2012.709377>
- Lauby-secretan, B., Loomis, D., Baan, R., Ghissassi, F. El, Bouvard, V., Benbrahim-tallaa, L., Guha, N., Grosse, Y., 2015. Use of mechanistic data in the IARC evaluations of the carcinogenicity of polychlorinated biphenyls and related compounds. *Env. Sci Pollut Res*. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4829-4>
- Ledda, C., Loreto, C., Zammit, C., Marconi, A., Fago, L., Matera, S., Costanzo, V., Sanzà, G.F., Palmucci, S., Ferrante, M., Costa, C., Fenga, C., Biondi, A., Pomara, C., Rapisarda, V., 2017. Non - infective occupational risk factors for hepatocellular carcinoma : A review ( Review ). *Mol. Med. Rep.* 15, 511–533. <https://doi.org/10.3892/mmr.2016.6046>
- Li, M., Wu, H., Yang, C., Chen, P., Lambert, G.H., Leon, Y., 2015. Gestational exposure to polychlorinated biphenyls and dibenzofurans induced asymmetric hearing loss : Yucheng children study. *Environ. Res.* 137, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.002>
- Li, T., Jin-nan, C., Yang, L., Xue-mei, H., Guan-nan, L., Xiao-ping, T., Chun-xia, J., Feng, C., 2017. PCB 118-induced endothelial cell apoptosis

- is partially mediated by excessive ROS production. *Toxicol. Mech. Methods.* <https://doi.org/10.1080/15376516.2017.1296050>
- Lignell, S., Aune, M., Darnerud, P.O., Soeria-Atmadja, D., Hanberg, A., Larsson, S., Glynn, A., 2011. Large variation in breast milk levels of organohalogenated compounds is dependent on mother's age, changes in body composition and exposures early in life. *J. Environ. Monit.* 13, 1607–1616. <https://doi.org/10.1039/c1em10151j>
- Lignell, S., Aune, M., Ola, P., Cnattingius, S., Glynn, A., 2009. Persistent organochlorine and organobromine compounds in mother's milk from Sweden 1996 – 2006: Compound-specific temporal trends. *Environ. Res.* 109, 760–767. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.04.011>
- Markowitz, G., 2018. From Industrial Toxins to Worldwide Pollutants: A Brief History of Polychlorinated Biphenyls. *Public Health Rep.* 133, 721–725. <https://doi.org/10.1177/0033354918801578>
- Megson, D., Sullivan, G.O., Comber, S., Worsfold, P.J., Lohan, M.C., Edwards, M.R., Shields, W.J., Sandau, C.D., Patterson, D.G., 2013. Elucidating the structural properties that influence the persistence of PCBs in humans using the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) dataset. *Sci. Total Environ.* 461–462, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.082>
- Meng, G., Feng, Y., Nie, Z., Wu, X., Wei, H., Wu, S., 2016. Internal exposure levels of typical POPs and their associations with childhood asthma in Shanghai, China. *Environ. Res.* 146, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.026>
- Mitoma, C., Mine, Y., Utani, A., Imafuku, S., Muto, M., Akimoto, T., Kanekura, T., Furue, M., Uchi, H., 2015. Chemosphere Current skin symptoms of Yusho patients exposed to high levels of in 1968. *Chemosphere* 137, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.070>

- Mohamad, A., Azlan, A., Adon, M.Y., Khoo, H.E., Razman, M.R., 2015. Polychlorinated biphenyl and heavy metal exposures among fishermen in the Straits of Malacca : neurobehavioural performance. *Asia Pac J Clin Nutr* 24, 515–524. <https://doi.org/10.6133/apjcn.2015.24.3.06>
- Moleti, A., Sisto, R., Todd, A., Republic, S., Vergata, T., Catone, M.P., Republic, S., Surgery, M., Republic, S., 2018. PCB exposure and cochlear function at age 6 years. *Environ. Res.* 151, 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.017>.PCB
- Moon, H.-B., Lee, D.-H., Lee, Y.S., Kannan, K., 2011. Concentrations and accumulation profiles of PCDDs , PCDFs and dioxin-like PCBs in adipose fat tissues of Korean women. *J. Environ. Monit.* 13, 1096–1101. <https://doi.org/10.1039/c0em00730g>
- Mullerova, D., Pesta, M., Dvorakova, J., Cedikova, M., Kulda, V., Dvorak, P., Bouchalová, V., Kralickova, M., Babuska, V., Kuncova, J., Langmajerova, J., Muller, L., 2017. Polychlorinated Biphenyl 153 in Lipid Medium Modulates Differentiation of Human Adipocytes. *Physiol Res* 66, 653–662.
- Naqvi, A., Qadir, A., Mahmood, A., Baqar, M., Aslam, I., Sajid, F., Mumtaz, M., Li, J., Zhang, G., 2018. Quantification of polychlorinated biphenyl contamination using human placenta as biomarker from Punjab Province , Pakistan. *Environ. Sci. Pollut. Res.*
- Nowack, N., Wittsiepe, J., Kasper-sonnenberg, M., Wilhelm, M., 2015. Influence of Low-Level Prenatal Exposure to PCDD / Fs and PCBs on Empathizing , Systemizing and Autistic Traits : Results from the Duisburg Birth Cohort Study. *PLoS One* 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129906>
- Pelletier, M., Bonvallot, N., Ramalho, O., Blanchard, O., Mercier, F., Mandin, C., Le, B., Glorennec, P., 2017. Dermal absorption of semivolatile

- organic compounds from the gas phase : Sensitivity of exposure assessment by steady state modeling to key parameters. *Environ. Int.* 102, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.005>
- Pencíková, K., Svrzkova, L., Strapacova, S., Neca, J., Bartonkova, I., Dvorak, Z., Hýzďalova, M., Pivnicka, J., Palkova, L., Lehmler, H.-J., Li, X., Vondracek, J., Machala, M., 2018. In vitro pro fi ling of toxic effects of prominent environmental lower- chlorinated PCB congeners linked with endocrine disruption and n cíkov a k Dvo lkov a. *Environ. Pollut.* 237, 473–486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.067>
- Perkins, J.T., Petriello, M.C., Newsome, B.J., Hennig, B., 2016. Polychlorinated Biphenyls and links to Cardiovascular Disease. *Env. Sci Pollut Res Int* 23, 2160–2172. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4479-6>. Polychlorinated
- Petersen, M.S., Halling, J., Jørgensen, N., Grandjean, P., Jensen, T.K., Weihe, P., 2018. Reproductive Function in a Population of Young Faroese Men with Elevated Exposure to Polychlorinated Biphenyls ( PCBs ) and Perfluorinated Alkylate Substances ( PFAS ). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091880>
- Phillips, M.C., Dheer, R., Santaolalla, R., Davies, J.M., Lang, J.K., Toborek, M., Abreu, M.T., 2018. Intestinal exposure to PCB 153 induces inflammation via the ATM/NEMO pathway. *Toxicol Appl Pharmacol* 15, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2017.11.027>. Intestinal
- Pinson, A., Franssen, D., Gérard, A., Parent, A.-S., Bourguignon, J.-P., 2017. Neuroendocrine disruption without direct endocrine mode of action: Polychloro-biphenyls (PCBs) and bisphenol A (BPA) as case studies. *C. R. Biol.* 340, 432–438. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2017.07.006>
- Pizzini, S., Sbicego, C., Corami, F., Grotti, M., Magi, E., Bonato, T., Cozzi, G., Barbante, C., Piazza, R., 2017. 3,3'-dichlorobiphenyl (non-Aroclor PCB-11) as a marker of non-legacy PCB contamination in

- marine species: comparison between Antarctic and Mediterranean bivalves. *Chemosphere* 175, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.023>
- Prince, M.M., Ruder, A.M., Hein, M.J., Waters, M.A., Whelan, E.A., Nilsen, N., Ward, E.M., Schnorr, T.M., Laber, P.A., Davis-king, K.E., 2006. Mortality and Exposure Response among 14,458 Electrical Capacitor Manufacturing Workers Exposed to Polychlorinated Biphenyls ( PCBs ) 1508, 1508–1514. <https://doi.org/10.1289/ehp.9175>
- Reijnders, P., 1988. Environmental impact of PCBs in the marine environment, in: Newman, P., Agg, A. (Eds.), *Environmental Protection of the North Sea*. Heinemann, pp. 85–98.
- Rodriguez, E.A., Vanle, B.C., Doorn, J.A., Lehmler, H., Robertson, L.W., Du, M.W., 2018. Hydroxylated and sulfated metabolites of commonly observed airborne polychlorinated biphenyls display selective uptake and toxicity in N27, SH-. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 62, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.06.010>
- Ruder, A.M., Hein, M.J., Hopf, N.B., Waters, M.A., 2017. Cancer Incidence Among Capacitor Manufacturing Workers Exposed to Polychlorinated Biphenyls. *Am J Ind Med* 60, 198–207. <https://doi.org/10.1002/ajim.22657>.Cancer
- Ruiz, P., Aylward, L.L., Mumtaz, M., 2014. Pharmacokinetic tetrachlorodibenzo-p-dioxin exposure assessment. *SAR QSAR Environ. Res.* 25, 37–41. <https://doi.org/10.1080/1062936X.2014.962083>
- Scinicariello, F., Buser, M.C., 2015. EBioMedicine Polychlorinated Biphenyls and Leukocyte Telomere Length : An Analysis of NHANES 1999 – 2002. *EBIOM2*, 1974–1979. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2015.11.028>
- Shapiro, G.D., Dodds, L., Arbuckle, T.E., Ashley-martin, J., Ettinger, A.S., Fisher, M., Taback, S., Bouchard, M.F., Monnier, P., Dallaire, R., Morisset, A., Fraser, W., 2016. Exposure to organophosphorus

- and organochlorine pesticides , per fl uoroalkyl substances , and polychlorinated biphenyls in pregnancy and the association with impaired glucose tolerance and gestational diabetes mellitus : The MIREC Study. *Environ. Res.* 147, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.01.040>
- Singh, K., Chan, H.M., 2018. Association of blood polychlorinated biphenyls and cholesterol levels among Canadian Inuit. *Environ. Res.* 160, 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.010>
- Su, P., Chen, H., Chen, S., Chen, J., Liou, S., Wang, S., 2015. Thyroid and growth hormone concentrations in 8-year-old children exposed in utero to dioxins and polychlorinated biphenyls. *J. Toxicol. Sci.* 40, 309–319.
- Tatsuta, N., Kurokawa, N., Nakai, K., Suzuki, K., Iwai-shimada, M., 2017. Effects of intrauterine exposures to polychlorinated biphenyls , methylmercury , and lead on birth weight in Japanese male and female newborns. *Environ. Health Prev. Med.* 22–39. <https://doi.org/10.1186/s12199-017-0635-6>
- Vieira, V.M., Fabian, M.P., Webster, T.F., Levy, J.I., Korrick, S.A., 2017. Spatial Variability in ADHD-Related Behaviors Among Children Born to Mothers Residing Near the New Bedford Harbor Superfund Site. *Am. J. Epidemiol.* 185, 924–932. <https://doi.org/10.1093/aje/kww208>
- Wahlang, B., 2018. Exposure to persistent organic pollutants : impact on women ' s health. *Rev Env. Heal.*
- Wang, X., Xu, Y., Song, X., Jia, Q., Zhang, X., Qian, Y., Qiu, J., 2019. Analysis of glycerophospholipid metabolism after exposure to PCB153 in PC12 cells through targeted lipidomics by UHPLC-MS / MS. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 169, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.006>

- Wang, Y., Hu, J., Lin, W., Wang, N., Li, C., Luo, P., Zaffar, M., Wang, W., Su, X., Chen, C., Liu, Y., Huang, R., Shen, C., 2016. Health risk assessment of migrant workers ' exposure to polychlorinated biphenyls in air and dust in an e-waste recycling area in China : Indication for a new wealth gap in environmental rights. *Environ. Int.* 87, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.009>
- Wang, Y., Sun, X., Fang, L., Li, K., Yang, P., Du, L., Ji, K., 2018. Genomic instability in adult men involved in processing electronic waste in Northern China. *Environ. Int.* 117, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.027>
- Wood, S.A., Armitage, J.M., Binnington, M.J., Wania, F., 2016. Deterministic modeling of the exposure of individual participants in the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) to polychlorinated biphenyls. *Environ. Sci. Process. Impacts* 18, 1107–1248. <https://doi.org/10.1039/c6em00424e>
- Xu, D., Li, L., Liu, L., Dong, H., Deng, Q., Yang, X., 2014. Polychlorinated Biphenyl Quinone Induces Mitochondrial-Mediated and Caspase-Dependent Apoptosis in HepG2 Cells. *Env. Toxicol* 30, 1063–1072. <https://doi.org/10.1002/tox>
- YAMAMOTO, K., KUDO, M., ARITO, H., OGAWA, Y., TAKATA, T., 2015. A cross-sectional analysis of dioxins and health effects in municipal and private waste incinerator workers in Japan. *Ind. Health* 465–479.
- Yang, L., Can, H., Jian, W., Jin-nan, C., Guan-nan, L., Chun-xia, J., Qin, W., 2017. 2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl impairs insulin-induced NO production partly through excessive ROS production in endothelial cells. *Toxicol. Mech. Methods* 0, 000. <https://doi.org/10.1080/15376516.2017.1337259>



- Yao, M., Hu, T., Wang, Y., Du, Y., Hu, C., Wu, R., 2017. Polychlorinated biphenyls and its potential role in endometriosis \*. *Environ. Pollut.* 229, 837–845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.088>
- Zani, C., Toninelli, G., Filisetti, B., 2013. Polychlorinated Biphenyls and Cancer : An Epidemiological Assessment. *J. Environ. Sci. Heal.* 31, 37–41. <https://doi.org/10.1080/10590501.2013.782174>
- Zhang, L., Liu, X., Meng, G., Chi, M., Li, J., Yin, S., Zhao, Y., 2018. Non-dioxin-like polychlorinated biphenyls in early pregnancy and risk of gestational diabetes mellitus. *Environ. Int.* 115, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.012>
- Zheng, J., He, C., Chen, S., Yan, X., Guo, M., Wang, M., Yu, Y., Yang, Z., Mai, B., 2017. Disruption of thyroid hormone ( TH ) levels and TH-regulated gene expression by polybrominated diphenyl ethers ( PBDEs ), polychlorinated biphenyls ( PCBs ), and hydroxylated PCBs in e-waste recycling workers. *Environ. Int.* <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.009>
- Zimeri, A.M., Robb, S.W., Hassan, S.M., Hire, R.R., Davis, M.B., 2015. Assessing Heavy Metal and PCB Exposure from Tap Water by Measuring Levels in Plasma from Sporadic Breast Cancer Patients, a Pilot Study 15683–15691. <https://doi.org/10.3390/ijerph121215013>



# LIMBAH CAIR INDUSTRI MAKANAN DAN DAMPAK

## 4.1 Latar Belakang

Industri pangan adalah suatu usaha yang sangat dekat dengan kehidupan kita sehari-hari dan juga termasuk dalam salah satu penghasil limbah industri. Beberapa industri pangan yang menghasilkan pencemaran lingkungan antaranya adalah industri tempe tahu, pengolahan hasil laut dan tepung tapioka. Limbah ini dapat dihasilkan ketika proses pencucian atau pengolahan. Limbah industri yang dihasilkan oleh kegiatan industri pangan dapat berupa sejenis garam, mineral, karbohidrat, lemak dan protein. Jika pengolahan limbah ini tidak benar, maka dapat menyebabkan pencemaran berat terhadap air dan udara. Hal yang paling terasa dari pencemaran ini adalah umumnya bau yang menyengat dan menusuk hidung. Hal yang ada bisa lebih berbahaya lagi jika industri pangan tersebut menggunakan bantuan zat kimia yang menghasilkan limbah berupa alkohol, insektisida dan energi panas. Jika tidak diolah dan langsung dibuang ke sungai maka dapat mengganggu ekosistem air. Ikan dan bioat lainnya dapat menyebabkan kematian.

Limbah cair atau buangan merupakan air yang tidak dapat dimanfaatkan lagi serta dapat menimbulkan dampak yang buruk terhadap manusia dan lingkungan. Keberadaan limbah cair tidak diharapkan di lingkungan karena tidak mempunyai nilai ekonomi. Pengolahan yang tepat bagi limbah cair sangat diutamakan agar tidak mencemari lingkungan.

Pencemaran air akibat pembuangan limbah zat pewarna dari pewarna tekstil, manufaktur dan sisa produksi makanan dan minuman yang mengandung pewarna adalah salah satu masalah lingkungan yang utama. Tartrazine secara luas digunakan dalam bahan makanan, kosmetik, obat-obatan dan tekstil. Karena struktur molekul kompleks dan besar tartrazin sebagian besar pewarna dianggap tidak teroksidasi oleh pengolahan limbah konvensional fisik dan biologis. Selain itu buangan air limbah industri bila tidak diolah terlebih dahulu mengakibatkan timbulnya pencemaran air sungai yang dapat merugikan masyarakat yang tinggal disepanjang aliran sungai, seperti berkurangnya hasil produk pertanian, menurunnya hasil tambak, maupun berkurangnya pemanfaatan air sungai oleh penduduk.

## **4.2 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Meningkatnya Jumlah Limbah Cair Industri Makanan Pada Lingkungan**

Sebuah penelitian di Uruguay menunjukkan bahwa orientasi kenyamanan konsumen, dan tren konsumen yang mendasarinya menuju kenyamanan makanan yang lebih besar, adalah pendorong utama limbah makanan baik di rumah tangga maupun di toko. Orientasi harga konsumen mungkin terkait dengan limbah makanan yang lebih besar di rumah tangga tetapi juga mungkin menjadi faktor yang meningkatkan pilihan makanan tidak optimal di toko, sehingga memainkan peran ganda tergantung pada konteksnya. Dengan demikian, karakteristik dan sikap individu yang berbeda mendorong perilaku terkait limbah makanan tergantung pada jenis perilaku dan jenis makanan (Aschemann-Witzel et al., 2018).

Pada 2013, jumlah total limbah cair yang dikumpulkan di Tiongkok adalah 172 juta ton, meningkat 11% dibandingkan dengan 155 juta ton pada tahun 2004. Sebagian besar dari produksi limbah cair ini adalah 55,86% adalah limbah makanan dapur: jadi China memproduksi 96 juta ton limbah dapur rumah tangga pada tahun 2013 (Zhou et al., 2014). Rata-rata, 98% limbah yang dibuang ke Tiongkok diolah melalui TPA atau pembakaran. Daur ulang, pengomposan, pencernaan anaerobik dan metode

pemulihan sumber daya lainnya minimal di bawah strategi pengelolaan limbah Tiongkok saat ini (China Statistical Yearbook, 2014). Makanan dapat dibusuk, dan ketika dikubur di TPA, itu terurai untuk menghasilkan metana, gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global 25 kali lebih besar dari CO<sub>2</sub> pada skala waktu 100 tahun (IPCC, 2007). Cina tidak sendirian dalam menghadapi tantangan ini: di Amerika Serikat pada 2010, limbah makanan mewakili komponen tunggal terbesar dari tempat pembuangan sampah MSW reaching; 97% dari semua limbah makanan berakhir di tempat pembuangan sampah. Tempat pembuangan sampah di AS mengeluarkan 27,5 juta ton (De Clercq et al., 2017).

Di Italia, sebagian besar makanan kemasan terbuang sia-sia selama fase distribusi dan di toko-toko eceran dibuang di TPA, karena tidak adanya sistem penyortiran yang dapat memisahkan makanan dari kemasan. Data untuk tahun 2015 di wilayah Emilia Romagna (Italia) dikumpulkan di wilayah ini, sekitar 14.600 ton makanan terbuang dalam saluran ritel setiap tahun (Vitale et al. 2018)

Limbah makanan (FW) yang dihasilkan di seluruh Rantai Nilai Makanan (FVC) ternyata menjadi salah satu masalah utama yang berkaitan dengan produksi makanan. Pada tahun 2011, Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (FAO) memperkirakan bahwa lebih dari sepertiga dari makanan yang diproduksi (sekitar 1,3 miliar ton) hilang. Pengemasan adalah bagian utama dari makanan apa pun, karena penting untuk memastikan bahwa sifat organoleptik dan higienisnya terjaga; juga, memastikan perlindungan dan konservasi kualitas makanan dan dapat berkontribusi untuk mengurangi produksi limbah (Bertolucci et al., 2014). Volume global bahan kemasan yang diproduksi dan dibuang setiap hari telah menyebabkan banyak peneliti menangani masalah dampak lingkungan, terutama di sektor makanan (Vitale et al. 2018).

### 4.3 Karakteristik Limbah Cair Industri Makanan

Air buangan industri berasal dari berbagai jenis industri akibat proses industri. Zat –zat yang terkandung sangat bervariasi sesuai dengan bahan baku yang digunakan oleh industri. Oleh karena itu perlu dilakukan pengolahan air limbah sebelum air hasil produksi dialirkan ke lingkungan. Karakteristik air limbah sangat penting untuk mengetahui jenis pengolahan limbah yang akan digunakan. Karakteristik air limbah sendiri di bagi secara umum menjadi (Herjanto, 2008):

#### 1. Karakteristik Fisik

Karakteristik fisik air limbah yang perlu diketahui adalah total solid, bau, temperatur, densitas, warna, konduktivitas, dan turbidity.

##### a. Total Solid

Total solid adalah semua materi yang tersisa setelah proses evaporasi pada suhu 103°C–105°C. Karakteristik yang bersumber dari saluran air domestik, industri, erosi tanah, dan infiltrasi ini dapat menyebabkan bangunan pengolahan penuh dengan sludge dan kondisi anaerob dapat tercipta sehingga mengganggu proses pengolahan.

##### b. Bau

Karakteristik ini bersumber dari gas-gas yang dihasilkan selama dekomposisi bahan organik dari air limbah atau karena penambahan suatu substrat ke air limbah.

##### c. Temperatur

Temperatur ini mempengaruhi konsentrasi oksigen terlarut di dalam air. Air yang baik mempunyai temperatur normal 8oC dari suhu kamar 27oC. Semakin tinggi temperatur air (>27oC) maka kandungan oksigen dalam air berkurang atau sebaliknya.

##### d. Density

Density adalah perbandingan antara masa dengan volume yang dinyatakan sebagai slug/ft<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>).

e. Warna

Air limbah yang berwarna banyak menyerap oksigen dalam air, sehingga dalam waktu lama akan membuat air berwarna hitam dan berbau.

f. Kekeruhan

Kekeruhan diukur dengan perbandingan antara intensitas cahaya yang dipendarkan oleh sampel air limbah dengan cahaya yang dipendarkan oleh suspensi standar pada konsentrasi yang sama (Herjanto, 2008).

2. Karakteristik Kimia

Pada air limbah ada tiga karakteristik kimia yang perlu diidentifikasi yaitu bahan organik, anorganik, dan gas.

3. Karakteristik Biologi

Pada air limbah, karakteristik biologi menjadi dasar untuk mengontrol timbulnya penyakit yang dikarenakan organisme pathogen. Karakteristik biologi tersebut seperti bakteri dan mikroorganisme lainya yang terdapat dalam dekomposisi dan stabilisasi senyawa organik (Herjanto, 2008).

#### 4.4 Dampak Pencemaran Limbah Cair Industri Makanan

Sektor Industri/usaha kecil pangan yang mencemari lingkungan antara lain: tahu, tempe, tapioka, dan pengolahan ikan (industri hasil laut). Limbah usaha kecil pangan dapat menimbulkan masalah dalam penanganannya, karena mengandung sejumlah besar karbohidrat, protein, lemak, garam-garam, mineral, dan sisa-sisa bahan kimia yang digunakan dalam pengolahan, dan pembersihan. (Tonini et al, 2018).

Contohnya limbah industri tahu, tempe, tapioka, industri hasil laut, dan industri pangan lainnya, dapat menimbulkan bau yang menyengat dan polusi berat pada air, bila pembuangannya tidak diberi perlakuan yang tepat. Air buangan (*efluen*) atau limbah buangan dari pengolahan pangan dengan *Biological Oxygen Demand* ( BOD) tinggi dan mengandung polutan

seperti tanah, larutan alkohol, panas, dan insektisida. Apabila *efluen* dibuang langsung ke suatu perairan akibatnya mengganggu seluruh keseimbangan ekologis dan bahkan dapat menyebabkan kematian ikan dan biota perairan lainnya.

Secara umum kondisi bahan pencemar dapat digolongkan atau diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Senyawa-Senyawa Organic Terlarut

Senyawa ini dapat menyebabkan berkurangnya oksigen terlarut di dalam badan air. hal ini akan membahayakan kehidupan biota di perairan. disamping itu dalam suasana anaerob akan menimbulkan bau yang tidak menyenangkan (bau busuk).

a. Padatan Tersuspensi

Bahan ini merupakan senyawa organic yang tidak larut dalam air. bahan ini juga relative mudah terdekomposisi sehingga menyebabkan berkurang atau habisnya oksigen terlarut di dalam air yang pada gilirannya akan mengganggu kehidupan hewan dan tumbuh-tumbuhan.

b. warna dan kekeruhan

Warna dan kekeruhan ini akan menyebabkan masalah estetika.

c. Adanya Senyawa Nitrogen Dan Fosfor

Adanya Senyawa Nitrogen Dan Fosfor di dalam air yang dibuang langsung ke badan air, akan menimbulkan proses eutrofikasi dan pertumbuhan algae yang tidak terkontrol.

d. Minyak

Pembuangan limbah cair yang mengandung minyak akan memperbesar kandungan bahan organic di dalam limbah cair tersebut (Prayudi, et al, 2018).

Limbah organik mengandung sisa-sisa bahan organik, detergen, minyak dan kotoran manusia. Limbah ini dalam skala kecil tidak akan terlalu mengganggu, akan tetapi dalam jumlah besar sangat merugikan. Dampak negatif yang dapat ditimbulkan limbah cair adalah sebagai berikut:



## 1. Gangguan terhadap kesehatan manusia

Limbah cair yang dihasilkan mengandung padatan tersuspensi maupun terlarut seperti bakteri, virus, senyawa nitrat, beberapa bahan kimia dari industri dan jenis pestisida yang terdapat dari rantai makanan, serta beberapa kandungan logam seperti merkuri, timbal, dan kadmium akan mengalami perubahan fisika, kimia, dan hayati yang akan menimbulkan gangguan terhadap kesehatan karena menghasilkan zat beracun atau menciptakan media untuk tumbuhnya kuman penyakit atau kuman lainnya yang merugikan baik pada produk tahu sendiri ataupun tubuh manusia. Bila dibiarkan, air limbah akan berubah warnanya menjadi cokelat kehitaman dan berbau busuk. Bau busuk ini mengakibatkan sakit pernapasan. Apabila air limbah ini merembes ke dalam tanah yang dekat dengan sumur maka air sumur itu tidak dapat dimanfaatkan lagi. Apabila limbah ini dialirkan ke sungai maka akan mencemari sungai dan bila masih digunakan akan menimbulkan gangguan kesehatan yang berupa penyakit gatal, diare, kolera, radang usus dan penyakit lainnya, khususnya yang berkaitan dengan air yang kotor dan sanitasi lingkungan yang tidak baik (Herjanto, 2008).

Dampak toksisitas akan terlihat pada manusia, terutama terkait dengan Produksi Makanan karena pelepasan logam ke air dan tanah setelah penggunaan bahan kimia dan pupuk selama pertanian (Tonini et al, 2018).

## 2. Gangguan Terhadap Keseimbangan Ekosistem

Pada umumnya limbah industri makanan tidak membahayakan kesehatan masyarakat, karena tidak terlibat langsung dalam perpindahan penyakit. Akan tetapi kandungan organiknya yang tinggi dapat bertindak sebagai sumber makanan untuk pertumbuhan mikroba. Dengan pasokan makanan yang berlimpah, mikroorganisme akan berkembang biak dengan cepat dan mereduksi oksigen terlarut yang terdapat dalam air. Secara normal, air mengandung kira-kira 8 ppm oksigen terlarut. Standar minimum oksigen terlarut untuk kehidupan ikan adalah 5 ppm dan di bawah standar ini akan menyebabkan kematian ikan dan biota perairan lainnya.

Kerusakan terhadap tanaman dan binatang yang hidup pada perairan disebabkan oleh eutrofikasi yaitu pencemaran air yang disebabkan oleh munculnya nutrient yang berlebihan ke dalam ekosistem air, air dikatakan eutrofik jika konsentrasi total phosphorus (TP) dalam air berada dalam rentang 35- 10 µg/L dan pertumbuhan tanaman yang berlebihan (Herjanto, 2008).

Limbah makanan, terutama bila tidak dapat dihindari, menyebabkan hilangnya sumber daya alam dan dampak lingkungan yang cukup besar karena berbagai proses yang terlibat dalam siklus hidup dalam ekosistem (Tonini, et al., 2018).

### 3. Gangguan Terhadap Estetika Dan Benda

Gangguan kenyamanan dan estetika berupa warna, bau, dan rasa. Kerusakan benda yang disebabkan oleh garam-garam terlarut seperti korosif atau karat, air berlumpur, menyebabkan menurunnya kualitas tempat-tempat rekreasi dan perumahan akibat bau serta eutrofikasi (Herjanto, 2008).

Herlambang (2002) menuliskan dampak yang ditimbulkan oleh pencemaran bahan organik limbah industri makanan adalah gangguan terhadap kehidupan biotik. Turunnya kualitas air perairan akibat meningkatnya kandungan bahan organik. Aktivitas organisme dapat memecah molekul organik yang kompleks menjadi molekul organik yang sederhana. Bahan anorganik seperti ion fosfat dan nitrat dapat dipakai sebagai makanan oleh tumbuhan yang melakukan fotosintesis. Selama proses metabolisme oksigen banyak dikonsumsi, sehingga apabila bahan organik dalam air sedikit, oksigen yang hilang dari air akan segera diganti oleh oksigen hasil proses fotosintesis dan oleh reaerasi dari udara. Sebaliknya jika konsentrasi beban organik terlalu tinggi, maka akan tercipta kondisi anaerobik yang menghasilkan produk dekomposisi berupa amonia, karbondioksida, asam asetat, hidrogen sulfida, dan metana. Senyawa-senyawa tersebut sangat toksik bagi sebagian besar hewan air, dan akan menimbulkan gangguan terhadap keindahan (gangguan estetika) yang berupa rasa tidak nyaman dan menimbulkan bau.

Eutrofikasi adalah suatu fenomena yang melibatkan banyak faktor seperti kekeruhan, sedimen, produktivitas dan suhu rata-rata. Ganggang menyebabkan eutrofikasi karena menambah bahan organik pada sistem. Bila oksigen terlarut dalam air habis sama sekali karena kadar bahan organik yang tinggi, maka akan timbul bau busuk dan warna air menjadi gelap. Bila protein yang terdapat dalam air mengandung sulfur atau kandungan sulfat alamiah dari air tinggi, maka akan dihasilkan hidrogen sulfida yang menimbulkan bau yang tidak diinginkan dan menghitamkan bangunan yang di cat di sekitarnya. Sebagai usaha menghindarkan terjadinya polusi air ini, maka di butuhkan suatu standar untuk buangan industri yang akan bervariasi tergantung pada di mana efluen akan dibuang, tingkat pengenceran dalam aliran penerima dan apakah fasilitas kota tersedia untuk penampungan dan penanganannya (Prayudi, et al, 2018).

Sebagian besar dampak terkait limbah makanan berasal dari langkah produksi, dampak terkait limbah makanan dapat dikaitkan dengan 73% pada langkah produksi, 6% pada pemrosesan makanan, 7% pada ritel dan distribusi, 8% pada konsumsi makanan dan 6% pada pembuangan makanan (Scherhauser et al. 2018).

Luasnya limbah makanan menimbulkan kekhawatiran tentang pengaruhnya terhadap penggunaan sumber daya alam, ketahanan pangan, dan keberlanjutan masa depan dari sektor pangan internasional. Diharapkan bahwa negara-negara berkembang dengan kelas menengah yang tumbuh akan menunjukkan tingkat dan pola yang sama dari limbah makanan yang terkait dengan konsumen, yang mengganggu mengingat bahwa limbah makanan hidup berdampingan dengan kerawanan pangan (Aschemann et al., 2018).

#### **4.5 Penanganan Limbah Cair Industri Makanan**

Sebagian besar limbah cair industri pangan dapat ditangani dengan mudah dengan sistem biologis karena polutan utamanya berupa bahan organik, seperti karbohidrat, lemak, protein, dan vitamin. Polutan tersebut umumnya dalam bentuk tersuspensi atau terlarut.

Sebelum dibuang, ke lingkungan, limbah cair industri pangan harus diolah untuk melindungi keselamatan masyarakat dan kualitas lingkungan. Tujuan dasar pengolahan limbah cair adalah untuk menghilangkan sebagian besar padatan tersuspensi dan bahan terlarut, kadang-kadang juga untuk penyisihan unsur hara (nutrien) berupa nitrogen dan fosfor. Secara umum, pengolahan limbah cair dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu pengolahan primer, pen-,olahan sekunder, dan pengolahan tersier. Pengolahan primer merupakan pengolahan secara fisik untuk menyisahkan benda-benda terapung atau padatan tersuspensi terendapkan (settleable solids) (Prayudi, et al, 2018).

Berikut diuraikan beberapa sistem pengolahan limbah cair yang sesuai untuk limbah cair industri pangan skala kecil, meliputi: (a) sistem lumpur aktif (b) sistem trikling filter, (c) sistem RBC (Rotating Biolocal Disk), (d) sistem SBR (Sequencing Batch Reactor), (e) kolam oksidasi, (f) sistem UASB, dan (e) septik tank. Kedua sistem terakhir ini termasuk dalam kategori pengolahan limbah cair secara anaerobik.

#### a. Sistem Lumpur Aktif

Prinsip. Pada dasarnya sistem lumpur aktif terdiri atas dua unit proses utama, yaitu bioreaktor (tangki aerasi) dan tangki sedimentasi. Dalam sistem lumpur aktif, limbah cair dan biomassa dicampur secara sempurna dalam suatu reaktor dan diaerasi. Pada umumnya, aerasi ini juga berfungsi sebagai sarana pengadukan suspensi tersebut. Suspensi biomassa dalam limbah cair kemudian dialirkan ke tangki sedimentasi~ dimana biomassa dipisahkan dari air yang telah diolah. Sebagian biomassa yang terendapkan dikembalikan ke bioreaktor, dan air yang telah terolah dibuang ke lingkungan. Dalam sistem tersebut, mikroorganisme dalam biomassa (bakteri dan protozoa) mengkonversi bahan organik terlarut sebagian menjadi produk akhir (air, karbon dioksida), dan sebagian lagi menjadi sel (biomassa).

Kelebihan dan Kekurangan. Sistem lumpur aktif dapat diterapkan untuk hampir semua jenis limbah cair industri pangan, baik untuk oksidasi karbon, nitrifikasi, denitrifikasi, maupun eliminasi fosfor secara biologis. Kendala

yang mungkin dihadapi oleh dalam pengolahan limbah cair industri pangan dengan sistem ini kemungkinan adalah besarnya biaya investasi maupun biaya operasi, karena sistem ini memerlukan peralatan mekanis seperti pompa dan blower. Biaya operasi umumnya berkaitan dengan pemakaian energi listrik.

b. *Sistem Trickling Filter*

Prinsip. Trickling filter terdiri atas tumpukan media padat dengan kedalaman sekitar 2 m, umumnya berbentuk silinder. Limbah cair disebarakan ke permukaan media bagian atas dengan lengan distributot berputar, dan air kemudian mengalir (menetes) ke bawah melalui lapisan media. Polutan dalam limbah cair yang mengalir melalui permukaan media padat akan terabsorps oleh mikroorganisme yang tumbuh dan berkembang pada permukaan media padat tersebut. Setelah mencapai ketebalan tertentu, biasanya lapisan biomassa ini terbawa aliran limbah cair ke bagian bawah. Limbah cair di bagian bawah dialirkan ke tangki sedimentasi untuk memisahkan biomassa. Resirkulasi dari tangki sedimentasi diperlukan untuk meningkatkan efisiensi.

Kelebihan dan Kekurangan. Sistem trickling filter sesuai untuk pengolahan limbah cair dengan relatif kecil, baik untuk tujuan oksidasi karbon maupun nitrifikasi. Desain dan operasi trickling filter cukup sederhana, tetapi sistem ini memerlukan klarifier primer, klarifier sekunder, serta memerlukan resirkulasi efluen. Terdapat potensi terjadinya penyumbatan pada media filter oleh benda berukuran besar (seperti plastik, ranting, daun, kayu), terutama jika sistem tidak dilengkapi fasilitas penyaringan kasar.

c. *RBC (Rotating Biological Contactor)*

Prinsip. Sistem RBC terdiri atas deretan cakram yang dipasang pada as horisontal dengan jarak sekitar 4 cm. Contoh RBC dapat dilihat pada Gambar 6. Sebagian dari cakram tercelup dalam limbah cair, dan sebagian lagi kontak dengan udara. Pada saat as diputar, permukaan cakram secara bergantian kontak dengan limbah cair dan kemudian kontak dengan udara.

Akibatnya, mikroorganisme tumbuh pada permukaan cakram sebagai lapisan biologis (biomasa), dan mengabsorpsi bahan organik dalam limbah cair.

d. SBR (*Sequencing Batch Reactor*)

Prinsip. Sistem SBR adalah suatu sistem lumpur aktif yang dioperasikan secara curah (batch). Satuan proses dalam sistem SBR identik dengan satuan proses dalam sistem lumpur aktif, yaitu aerasi dan sedimentasi untuk memisahkan biomassa. Pada sistem lumpur aktif, kedua proses tersebut berlangsung dalam dua tanki yang berdan, sedangkan pada SBR berlangsung secara bergantian pada tanki yang sama. Keunikan lain sistem SBR adalah bahwa tidak diperlukan resirkulasi sludge. Proses sistem SBR terdiri atas lima tahap, yaitu pengistaran, reaksi (aerasi), pengendapan (sedimentasi), pembuangan, dan istirahat (idle).

Sistem SBR dapat dimodifikasi untuk oksidasi karbon, nitrifikasi, denitrifikasi, dan eliminasi fosfor, yaitu dengan urutan siklus: penaisian pengadukan dalam kondisi anaerobik - aerasi - pengadukan dalam kondisi anoksi pengendapan - dekantasi. Pelepasan fosfor dan pengambilan BOD terjadi selama fase anaerobik, dan pengambilan fosfor terjadi di fase aerobik. Waktu kontak dalam kondisi anarobik minimum 0,75 jam.

Kelebihan dan Kekurangan. Kelebihan sistem SBR antara lain sebagai berikut: sesuai untuk volume limbah cair kecil atau bervariasi, dapat digunakan untuk eliminasi karbon, nitrogen dan fosfor, proses eliminasi karbon, nitrogen, dan fosfor, serta pemisahan biomassa sedimentast) berlangsung dalam satu reaktor. Kelemahan sistem SBR adalah hanya sesuai untuk jumlah limbah cair kecil dan tidak kontinu. Sistem SBR dioperasikan secara curah (batch), sehingga untuk operasi kontinu diperlukan beberapa SBR yang dioperasikan secara parallel.

e. Sistem Kolam (Kolam Oksidasi).

Prinsip. Sistem kolam (pola sistem) atau sering disebut juga sebagai kolam oksidasi merupakan salah satu sistem pengolahan limbah cair tertua,

dan merupakan perkembangan dari cara pembuangan limbah cair secara langsung ke badan air. Pada sistem kolam, konsentrasi mikroorganisme relatif kecil, suplai oksigen dan pengadukan berlangsung secara alami, sehingga proses perombakan bahan organik berlangsung relatif lama dan pada area yang luas.

Berbagai jenis mikroorganisme berperan dalam proses perombakan, tidak terbatas mikroorganisme aerobik, tetapi juga mikroorganisme anaerobik. Organisme heterotrof aerobik dan aerobik berperan dalam proses konversi bahan organik; organisme autotrof (fitoplankton, alga, tanaman air) mengambil bahan-bahan anorganik (nitrat dan fosfat) melalui proses fotosintesis (Gambar 9). Karena lamanya waktu tinggal limbah cair, maka organisme dengan waktu generasi tinggi (zooplankton, larva insekta, kutu air, ikan kecil) juga dapat tumbuh dan berkembang dalam sistem kolam. Organisme tersebut hidup aktif di dalam air atau pada dasar kolam. Komposisi organisme sangat tergantung pada temperatur, suplai oksigen, sinar matahari, jenis dan konsentrasi substrat.

Kelebihan dan Kekurangan. Sistem kolam merupakan sistem pengolahan limbah cair sederhana yang tidak memerlukan peralatan mekanis, mudah dioperasikan dan tidak memerlukan biaya tinggi. Kekurangan sistem ini adalah sangat tergantung pada cuaca, dan memerlukan lahan luas, serta berpotensi menimbulkan bau busuk terutama pada malam hari dimana suplai oksigen tidak mencukupi untuk proses aerobik. Selain itu, kolam juga dapat digunakan sebagai tempat berkembang biak nyamuk.

f. UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*)

Prinsip. UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*) merupakan salah jenis reaktor anaerobik yang paling banyak diterapkan untuk pengolahan berbagai jenis limbah cair. Berbeda dengan proses aerobik, dimana bahan organik dikonversi menjadi produk akhir berupa karbon dioksida dan air, pada proses anaerobik sebagai produk adalah gas metana dan karbon dioksida.

Perbedaan lain antara proses aerobik dan anerobik terletak pada karakteristik biomassa yang menentukan jalannya proses perombakan. Pada proses aerobik, biomassa terdiri atas berbagai jenis mikroorganisme, tetapi masing-masing merombak bahan organik untuk keperluannya masing-masing. Pada proses anaerobik, sebenarnya biomassa juga terdiri atas berbagai jenis mikroorganisme, tetapi merombak bahan organik satu setelah yang lain dari bahan organik hingga biogas.

Dengan demikian, proses berlangsung sempurna hingga menghasilkan produk akhir, hanya jika proses pertukaran massa pada setiap mikroorganisme yang terlibat berlangsung dengan kecepatan sama. Karena alasan tersebut, proses anaerobik lebih sensitif terhadap pengaruh bahan toksik, pH, dan temperatur dibanding dengan proses aerobik.

Kelebihan dan Kekurangan. Kelebihan reaktor UASB adalah konstruksi sederhana, tanpa bahan untuk pertumbuhan mikroorganisme, paling banyak diterapkan pada skala teknis sehingga banyak pengalaman praktis. Kekurangan reaktor UASB antara lain adalah sangat sensitif terhadap perubahan beban Hidrolik dan beban organik laju perombakan relatif rendah dibanding dengan reaktor anaerobik lainnya, seperti reaktor fluidized bed. Kadar bahan organik dalam efluen UASB umumnya masih tinggi, sehingga memerlukan pengolahan tambahan, misalnya dengan proses aerobik.

#### g. Septik Tank

Prinsip. Sistem septik tank merupakan salah satu cara pengolahan limbah cair yang paling sederhana. Dalam sistem septik tank proses perombakan limbah cair berlangsung dalam kondisi anaerobik. Sistem septik tank harus dilengkapi dengan fasilitas untuk peresapan efluen.

Kelebihan dan Kekurangan. Kelebihan sistem septik tank untuk pengolahan limbah cair industri pangan antara lain adalah: dapat diterapkan untuk hampir semua jenis limbah industri pangan dengan kadar bahan organik tinggi, dapat diterapkan untuk debit limbah cair kecil dan tidak kontinu, biaya konstruksi, operasi dan pemeliharaan rendah, dan tidak memerlukan keahlian khusus baik untuk konstruksi maupun



pengoperasiannya. Kelemahan sistem ini adalah berpotensi mencemari air tanah (Dirjen Industri Kecil Menengah Departemen Perindustrian 2007).

Industri pangan dalam sytem rantai pangan menghasilkan hasil samping (by-products) dan limbah pangan (food wastes). Secara kimia, hasil damping dan limbah industry merupakan senyawa kimia, organic. Biomassa dan residu senyawa kimia organic kemudian di proses baik secara kimia, fisika, maupun bioteknologi menjadi bahan bakar metana, biodiesel, bioethanol, aseton butanol, dan hydrogen. Diharapkan, upaya ini dapat menjadi salah satu solusi ketersediaan bahan bakar secara nasional. Dukungan pemerintah juga sangat diperlukan melalui kebijakan, instruksi, strategi dan pengawasan menuju ketahanan energy, khususnya energy nonfosil (Rahayu 2018).

Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). Metode ini berfungsi untuk menganalisis potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari suatu aktivitas, dengan mengetahui input yang digunakan, baik energi maupun sumber daya alam. Metode ini juga dapat digunakan untuk memaksimalkan output dengan input yang sama, mengurangi penggunaan bahan baku dan transportasi, menerapkan pengendalian pencemaran, mengurangi emisi di lingkungan, dan memanfaatkan limbah.

#### 1. Mikroorganisme Pengurai Air Limbah

Menurut (Sari Hartati 2019) dalam penanganan air limbah, mikroorganisme merupakan dasar fungsional untuk sejumlah proses penanganan. Hal utama dalam penanganan air limbah adalah pengembangan dan pemeliharaan kultur mikroba yang cocok. Proses penanganan biologi air limbah secara biologik terdiri dari campuran mikroorganisme yang mampu memetabolisme limbah organik. Kelompok mikroorganisme tersebut adalah bakteri, fungi, algae, protozoa, Rotifera, Crustacea, dan virus ((Gufuran 2019). Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme terpenting dalam penanganan air limbah. Dalam air dan penanganan air limbah, bakteri penting karena beberapa jenis bersifat patogenik

(menyebabkan penyakit) dan karena kultur bakteri dapat digunakan untuk menghilangkan bahan organik dan mineral-mineral yang tidak diinginkan dari air limbah. Bakteri aerob dan fakultatif, aktif dalam semua unit penanganan aerobik, sedangkan bakteri anaerob fakultatif dan obligat, aktif dalam unit penanganan anaerobik. Bakteri terdapat dalam berbagai bentuk, biasanya modifikasi dari silinder atau avoid (bulat), dengan ukuran beberapa mikrometer. Bakteri ini terdapat dalam proses penanganan limbah dalam bentuk gumpalan dari berbagai bentuk dan jenis. Temperatur dan pH memainkan peranan penting dalam hidup matinya bakteri, seperti hewan dan tumbuhan mikroskopis lainnya. Hal ini dapat diketahui bahwa dengan laju reaksi mikroorganisme meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur, dengan penggandaan kira-kira 10°C dari naiknya temperatur sampai beberapa pembatasan temperatur yang dapat dicapai. Menurut kisaran temperatur dimana bakteri berfungsi dengan baik, bakteri dapat diklasifikasikan menjadi cryophilic atau psychrophilic, mesophilic, dan termophilic (Suzantho and Hadi 2019; Yhonita, Dewi, and Suwandari n.d.)

## 2. Pertumbuhan Bakteri Dalam Air Limbah

(Astuti et al. 2019) Bakteri diperlukan untuk menguraikan bahan organik yang ada di dalam air limbah. Oleh karena itu, diperlukan jumlah bakteri yang cukup untuk menguraikan bahan-bahan tersebut. Bakteri itu sendiri akan berkembang biak apabila jumlah makanan yang terkandung di dalamnya cukup tersedia, sehingga pertumbuhan bakteri dapat dipertahankan secara konstan. Pada permulaannya bakteri berbiak secara konstan dan agak lambat pertumbuhannya karena adanya suasana baru pada air limbah tersebut, keadaan ini dikenal sebagai lag phase. Setelah beberapa jam berjalan maka bakteri mulai tumbuh berlipat ganda dan fase ini dikenal sebagai fase akselerasi (acceleration phase). Setelah tahap ini berakhir maka terdapat bakteri yang tetap dan bakteri yang terus meningkat jumlahnya. Pertumbuhan yang dengan cepat setelah fase kedua ini disebut sebagai log phase. Selama log phase

diperlukan banyak persediaan makanan, sehingga pada suatu saat terdapat pertemuan antara pertumbuhan bakteri yang meningkat dan penurunan jumlah makanan yang terkandung didalamnya. Apabila tahap ini berjalan terus, maka akan terjadi keadaan dimana jumlah bakteri dan makanan tidak seimbang dan keadaan ini disebut sebagai declining growth phase. Pada akhirnya makanan akan habis dan kematian bakteri akan terus meningkat sehingga tercapai suatu keadaan di mana jumlah bakteri yang mati dan tumbuh mulai berkembang yang dikenal sebagai stationary phase. Setelah jumlah makanan habis dipergunakan, maka jumlah kematian akan lebih besar dari jumlah pertumbuhannya, maka keadaan ini disebut endogeneous phase dan pada saat ini bakteri menggunakan energi simpanan ATP untuk pernafasannya sampai ATP habis yang kemudian akan mati (Samsudin et al. 2018).

### 3. Pengolahan Limbah Cair Anaerobik

Proses anaerobik pada hakikatnya adalah proses yang terjadi karena aktivitas mikroba yang dilakukan pada saat tidak terdapat oksigen bebas. Proses anaerobik dapat digunakan untuk mengolah berbagai jenis limbah yang bersifat biodegradable, termasuk limbah industri makanan salah satunya adalah limbah tahu. Proses biologi anaerobik merupakan sistem pengolahan air limbah tahu yang banyak digunakan. Pertimbangan yang dilakukan adalah mudah, murah dan hasilnya bagus. Proses biologi anaerobik merupakan salah satu sistem pengolahan air limbah dengan memanfaatkan mikroorganisme yang bekerja pada kondisi anaerob. Kumpulan mikroorganisme, umumnya bakteri, terlibat dalam transformasi senyawa kompleks organik menjadi metana. Selengkapnya terdapat interaksi sinergis antara bermacam-macam kelompok bakteri yang berperan dalam penguraian limbah. Kelompok bakteri non metanogen yang bertanggung jawab untuk proses hidrolisis dan fermentasi terdiri dari bakteri anaerob fakultatif dan obligat. Mikroorganisme yang diisolasi dari digester anaerobik adalah *Clostridium* spp., *Peptococcus* anaerobus, *Bifidobacterium* spp., *Desulphovibrio* spp., *Corynebacterium* spp.,

Lactobacillus, Actonomyces, Staphylococcus, and Eschericia coli (Analysis et al. 2017)

Ada tiga tahapan dasar yang termasuk dalam keseluruhan proses pengolahan limbah secara oksidasi anaerobik, yaitu : hidrolisis, fermentasi (yang juga dikenal dengan sebutan asidogenesis), dan metanogenesis (Azizah and Ningrum 2018). Selama proses hidrolisis, bakteri fermentasi merubah materi organik kompleks yang tidak larut, seperti selulosa menjadi molekul-molekul yang dapat larut, seperti asam lemak, asam amino dan gula. Materi polimer kompleks dihidrolisa menjadi monomer-monomer, contoh : selulosa menjadi gula atau alkohol. Molekul-molekul monomer ini dapat langsung dimanfaatkan oleh kelompok bakteri selanjutnya. Hidrolisis molekul kompleks dikatalisasi oleh enzim ekstra seluler seperti selulase, protease, dan lipase. Walaupun demikian proses penguraian anaerobik sangat lambat dan menjadi terbatas dalam penguraian limbah selulolitik yang mengandung lignin.

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses anaerobic (Murwanto 2018) yaitu : Suhu. Proses anaerobik dapat terjadi dibawah dua kisaran kondisi suhu, yaitu kondisi mesofilik, yaitu antara 20-45°C, pada umumnya 35°C dan kondisi termofilik, yaitu antara 50 - 65°C, pada umumnya 55°C. Suhu yang optimal dari proses anaerobik bervariasi tergantung pada komposisi nutrient di dalam digester, tetapi kebanyakan proses anaerobik seharusnya dipelihara secara konstan untuk mendukung tingkat produksi gas. Digester termofilik lebih efisien dalam hal waktu tinggal, tingkat kapasitas, dan jumlah produksi gas, tetapi di lain hal membutuhkan input panas yang lebih tinggi dan mempunyai sensitivitas yang tinggi yang membuat proses lebih problematik daripada digesti mesofilik. Waktu Tinggal. Waktu tinggal adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai proses degradasi materi-materi organik yang sempurna. Waktu tinggal bervariasi dengan memproses parameter-parameter, seperti memproses suhu dan komposisi limbah. Waktu tinggal untuk limbah yang diperlakukan dalam digester mesofilic dalam kisaran 15-30 hari dan 12-14 hari untuk digester termofilik pH. Nilai pH

yang optimal untuk proses asidogenesis dan metanogenesis berbeda-beda. Selama proses asidogenesis dibentuk asetat, laktat, dan asam propionat, dengan demikian pH turun. pH yang rendah dapat menghambat proses asidogenesis dan nilai pH dibawah 6,4 dapat bersifat racun untuk bakteri pembentuk metan (pH optimal untuk proses metanogenesis adalah antara 6,6-7). Kisaran pH optimal untuk semua yaitu antara 6,4-7,2. Rasio karbon dan nitrogen (C:N). Hubungan antara jumlah karbon dan nitrogen yang hadir dalam materi organik di gambarkan oleh rasio C : N. Rasio optimal C : N dalam proses anaerobik antara 20 : 30. Rasio C : N yang tinggi mengindikasikan adanya konsumsi nitrogen yang cepat oleh bakteri metanogen dan menghasilkan produksi gas yang rendah. Selain itu rasio C : N yang rendah menyebabkan akumulasi ammonia dan nilai pH yang melebihi 8,5 dan ini bersifat racun bagi bakteri metanogen. Mixing. Mixing di dalam digester, meningkatkan kontak antara mikroorganisme dengan substrat dan meningkatkan kemampuan populasi bakteri untuk memperoleh nutrisi. Mixing juga membangun gradien suhu di dalam digester. Mixing yang berlebihan dapat merusak mikroorganisme dan oleh karena itu mixing yang lambat lebih disukai.

#### 4. Anaerobik - Biogas

Secara umum proses anaerobik akan menghasilkan gas Methana (Biogas). Biogas (gas bio) adalah gas yang dihasilkan dari pembusukan bahan-bahan organik oleh bakteri pada kondisi anaerob (tanpa ada oksigen bebas). Biogas tersebut merupakan campuran dari berbagai macam gas antara lain :  $\text{CH}_4$  (54%-70%),  $\text{CO}_2$  (27%-45%),  $\text{O}_2$  (1%-4%),  $\text{N}_2$  (0,5%-3%),  $\text{CO}$  (1%), dan  $\text{H}_2$  <<<<< (KLH, 2006). Sifat penting dari gas metan ini adalah tidak berbau, tidak berwarna, beracun dan mudah terbakar. Karena sifat gas tersebut, maka gas metan ini termasuk membahayakan bagi keselamatan manusia (Sugiharto, 2005). Penggunaan biogas ini merupakan salah satu cara untuk mengurangi pencemaran lingkungan, karena dengan fermentasi bakteri anaerob (bakteri metan) maka tingkat pengurangan pencemaran lingkungan dengan parameter BOD, COD akan berkurang sampai 90%.

Sistem ini banyak dipakai dengan pertimbangan ada manfaat yang bisa diambil yaitu pemanfaatan biogas yang sangat memungkinkan digunakan sebagai bahan sumber energi karena gas metan sama dengan gas elpiji (liquid petroleum gas/LPG), perbedaannya adalah gas metan mempunyai satu atom C, sedangkan elpiji lebih banyak.

Upaya kelestarian lingkungan dari pencemaran limbah cair produksi pangan dapat dikurangi dengan beberapa faktor seperti praktik penggunaan pupuk kimia pada lahan pertanian yang tidak berkelanjutan, perubahan penggunaan lahan, emisi langsung dan tidak langsung dan generasi bioenergi yang tidak efisien (Lijó et al. 2017).

Untuk meningkatkan kelestarian lingkungan, kebijakan secara khusus harus ditetapkan untuk mencapai tujuan yang maksimal. Selain itu, kebijakan lingkungan harus dipromosikan, termasuk penggunaan aliran limbah dan dampak pengasaman, serta dampak eutrofikasi pada lingkungan (Lijó et al. 2017).

Penerapan kebijakan yang mengarahkan limbah makanan ke pengolahan dengan biogas seperti kebijakan yang diperkenalkan di Irlandia Utara yang melarang semua bentuk limbah cair ditimbun (Irlandia.,2015), telah menunjukkan manfaat pengolahan limbah cair bagi lingkungan dalam hal pembaharuan energi. Namun, ini juga menyoroti perlunya pendekatan terintegrasi untuk analisis tersebut, untuk memasukkan penilaian kebijakan pengelolaan limbah dan sumber daya, sebagai penghematan terbesar yaitu mengupayakan menghindari pembuangan limbah makanan, daripada menghasilkan energi terbarukan (Pérez-Camacho et al., 2018).

Enam saran perencanaan nasional yang bisa diusulkan dalam pengolahan limbah cair industry makanan adalah sebagai berikut: berdasarkan evaluasi kinerja: (1) pergeseran dari subsidi investasi modal ke subsidi berbasis kinerja diperlukan untuk operasi proyek yang lebih baik; (2) desain ulang dan penegakan kebijakan tarif feed-in; (3) promosi penggunaan bio-metana dan peningkatan ekonomi dari peningkatan biogas dengan memberi insentif pada “pengelompokan” proyek; (4) peningkatan efisiensi pengumpulan dengan memberikan insentif kepada produsen FW untuk

mengarahkan limbah ke proyek biogas; (5) memberi insentif pada proyek biogas untuk menghasilkan beberapa hasil yang menghasilkan pendapatan; (6) Memberikan insentif pada proyek biogas untuk bersama-sama mencerna limbah makanan dengan substrat lain (De Clercq et al, 2017).

Pirolisis dan pencernaan anaerob adalah dua strategi penting untuk pengelolaan limbah yang dapat digabungkan untuk produksi energi bersih. Prinsip kerja metode ini adalah menyelidiki efek dari 12 jenis biochar yang berasal dari empat bahan baku pada tiga suhu pirolisis pada produksi H<sub>2</sub> melalui pencernaan fermentasi dari limbah makanan dan lumpur limbah cair. Pemasangan model yang dimodifikasi menunjukkan bahwa penambahan biochar memperpendek waktu jeda sekitar 18–62% dan meningkatkan laju produksi H<sub>2</sub> maksimum sekitar 18–110%. Lebih lanjut, biochar yang diturunkan pada suhu pirolisis yang lebih tinggi meningkatkan produksi H<sub>2</sub> secara dramatis dibandingkan dengan yang diturunkan pada suhu rendah. Analisis komponen utama menunjukkan bahwa kapasitas buffer pH biochar sangat penting untuk promosi produksi H<sub>2</sub> fermentatif dengan mengurangi penurunan pH yang disebabkan oleh akumulasi VFA. Akibatnya, strategi pengelolaan limbah terpadu yang berkelanjutan yang menggabungkan pirolisis dan pencernaan anaerobik diusulkan untuk pengolahan yang efisien dari berbagai limbah cair (Wang et al. 2018).

## 4.6 Kesimpulan

Limbah cair industri makanan adalah limbah cair hasil buangan industri makanan yang berasal dari proses produksi berlangsung. Faktor-faktor yang mempengaruhi meningkatnya jumlah limbah cair industri makanan di badan air yaitu meningkatnya nilai konsumsi masyarakat, tidak adanya cara penanganan limbah cair oleh industri makanan yang tepat, dan belum ditegaskannya kebijakan pemerintah. Ciri-ciri bila limbah cair ini ditemukan di badan air dapat diamati melalui karakteristik fisik (warna, bau, kekeruhan), karakteristik kimia(COD), karakteristik biologinya(BOD).

Dampak keberadaan limbah cair industri makanan terhadap lingkungan berupa merusa nilai estetika badan air, merusak siklus hidup biota air, merusak keseimbangan ekosistem air. Adapun dampaknya terhadap kesehatan manusia seperti munculnya penyakit diare, kolera, gatal-gatal, radang usus, dan penyakit lainnya. Jika limbah cair industri makanan tidak dikelola dengan baik maka akan menyebabkan pencemaran pada lingkungan secara berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan penanganan yang tepat termasuk penegakan kebijakan oleh pemerintah.

## Daftar Pustaka

- Aschemann-Witzel, Jessica, Ana Giménez, and Gastón Ares. 2018. "Convenience or Price Orientation? Consumer Characteristics Influencing Food Waste Behaviour in the Context of an Emerging Country and the Impact on Future Sustainability of the Global Food Sector." *Global Environmental Change* 49(September 2017): 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.02.002>.
- Astuti, Ariyanti Dwi, Badan Perencanaan, Pembangunan Daerah, and Kabupaten Pati. 2019. "Analisis Potensi Dampak Lingkungan Dari Budidaya Tebu Menggunakan Pendekatan Life Cycle Assessment (Lca) Potential Analysis of Environmental Impact of Sugarcane Plantation Using Life Cycle Assessment (Lca) Approach." XV(1).
- Azizah, Fitria Nur, and Prehatin Trirahayu Ningrum. 2018. "Identifikasi Pada Limbah Chromium (Cr) Pada Limbah Cair Dan Kerupuk Rambak Sebagai Upaya Pencegahan Terhadap Dampak Kesehatan." 4(1): 14–19.
- De Clercq, Djavan, Zongguo Wen, and Fei Fan. 2017. "Performance Evaluation of Restaurant Food Waste and Biowaste to Biogas Pilot Projects in China and Implications for National Policy." *Journal of Environmental Management* 189: 115–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.030>.



- Dirjen Industri Kecil Menengah Departemen Perindustrian. 2007. "Pengelolaan Limbah Industri Pangan." *Departemen Perindustrian, Jakarta*: 1–27.
- Gufuran, Muhammad. 2019. "Dampak Pembuangan Limbah Domestik Terhadap Pencemaran Air Tanah Di Kabupaten Pidie Jaya." *IV*(1): 416–25.
- Herjanto, Eddy. 2008. *Manajemen Operasi*. Edisi ketiga. Jakarta: Grasindo
- Lijó, Lucía, Sara González-García, Jacopo Bacenetti, and Maria Teresa Moreira. 2017. "The Environmental Effect of Substituting Energy Crops for Food Waste as Feedstock for Biogas Production." *Energy* 137: 1130–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.137>.
- Mallongi, A.; Rauf, A.U.; Astuti, R.D.P.; Palutturi, S.; Ishak, H., (2023). Ecological and human health implications of mercury contamination in the coastal water. *Global J. Environ., Sci. Manage.*, 9(2): 1-14.
- Murwanto, Bambang. 2018. "Efektivitas Jenis Koagulan Poly Aluminium Chloride Menurut Variansi Dosis Dan Waktu Pengadukan Terhadap Penurunan Parameter Limbah Cair Industri Tahu." 9(5): 143–53.
- Pérez-Camacho, María Natividad, Robin Curry, and Thomas Cromie. 2018. "Life Cycle Environmental Impacts of Substituting Food Wastes for Traditional Anaerobic Digestion Feedstocks." *Waste Management* 73: 140–55.
- Prayudi, Teguh, Prasetyadi, and Msc. Adi Mulyanto. 2018. *Teknologi Pengolahan Limbah Cair Industri Makanan Dengan Bahan Baku Ikan, Udang, Unggas Dan Daging*.
- Rahayu, Betty Sri Laksmi Jenie & Winiati Pudji. 2018. *15 Pengolahan Limbah Industri Pangan*.
- Samsudin, Winda et al. 2018. "Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menjadi Pupuk Organik Cair Dengan Penambahan Effektive Mikroorganisme-4 (EM-4)." 1.

- Sari Hartati, M. 2019. *Biodiesel: Minyak Bekas Penggorengan Tepung Ikan Sardin:Pemanfaatan Limbah.*
- Scherhauser, Silvia et al. 2018. "Environmental Impacts of Food Waste in Europe." *Waste Management* 77: 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.038>.
- Suzantho, Ferry, and Wahyono Hadi. 2019. "Perumusan Strategi Perbaikan Manajemen UKM Menuju Industri Hijau Studi Kasus Pada Empat UKM Di Surabaya." 0(20): 158–62.
- Tonini, Davide, Paola Federica Albizzati, and Thomas Fruergaard Astrup. 2018. "Environmental Impacts of Food Waste: Learnings and Challenges from a Case Study on UK." *Waste Management* 76: 744–66. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.032>.
- Vitale, Gianluca et al. 2018. "Environmental Impact of a New Industrial Process for the Recovery and Valorisation of Packaging Materials Derived from Packaged Food Waste." *Sustainable Production and Consumption* 14(xxxx): 105–21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.02.001>.
- Wang, Gaojun et al. 2018. "Impacts of Different Biochar Types on Hydrogen Production Promotion during Fermentative Co-Digestion of Food Wastes and Dewatered Sewage Sludge." *Waste Management* 80: 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.042>.
- Yhonita, Entri, Triana Dewi, and Anik Suwandari. "Analisis Keberlanjutan Agroindustri Tapioka Tradisional Di Indonesia." : 45–58.

# LIMBAH BAHAN BERACUN BERBAHAYA DAN DAMPAK KESEHATAN LINGKUNGAN

## 5.1 Latar Belakang

Kegiatan Industri merupakan salah satu unsur penting dalam menunjang pembangunan guna meningkatkan pertumbuhan ekonomi yang diharapkan dapat meningkatkan taraf hidup bangsa Indonesia. Akan tetapi kegiatan industri selain berdampak positif juga dapat berdampak negatif. Dampak positifnya menghasilkan barang dan jasa, meningkatkan lapangan kerja sedangkan dampak negatifnya menghasilkan limbah dan pencemaran lingkungan serta dapat merusak sumber daya alam dan menurunkan kualitas hidup karena lingkungan menjadi kotor dan tercemar (Gautam, Kumar, & Lokhandwala, 2019). Untuk itu dalam melakukan pembangunan industri harus sudah diperhitungkan dampak negatifnya

Pemerintah telah melakukan berbagai upaya untuk menekan dampak negatif industri antara lain dengan menganjurkan teknologi bersih, memasang alat pencegah pencemaran, melakukan proses daur ulang, dan menetapkan wajib pengolahan limbah bagi industri-industri (Wang, Xu, Yang, Zhang, & Cai, 2019). Sayangnya upaya-upaya tersebut belum dapat berjalan secara optimal karena alasan kurang biaya terutama untuk industri-industri kelas menengah ke bawah (modal kecil) atau karena ketidaktahuan dari pemilik industri.

Berbagai jenis limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang dibuang langsung ke lingkungan merupakan sumber pencemaran dan perusakan lingkungan (Nadal, García, Schuhmacher, & Domingo, 2019). Untuk menghindari terjadinya dampak akibat limbah B3 diperlukan suatu sistem pengelolaan yang terintegrasi dan berkesinambungan. Upaya pengelolaan limbah B3 tersebut merupakan salah satu usaha dalam pelaksanaan pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan hidup.

Agar usaha tersebut dapat berjalan dengan baik perlu di buat dan diterapkan suatu sistem manajemen pengelolaan, terutama pada sektor industri. Hal ini dapat dilaksanakan dengan memberlakukan peraturan perundang-undangan lingkungan hidup sebagai dasar dalam pelaksanaannya (KEMEN LH, 2014). Dengan diberlakukannya peraturan tersebut maka hak, kewajiban dan kewenangan dalam pengelolaan limbah B3 oleh setiap orang/badan usaha maupun organisasi kemasyarakatan dijaga dan dilindungi oleh hukum. Untuk menunjang pelaksanaan program-program tersebut, diperlukan sumber daya manusia (SDM) yang menguasai manajemen pengelolaan limbah B3, hak dan kewajiban instansi/badan usaha yang dipimpin dan kesadaran untuk melindungi lingkungan dari bahaya pencemaran dan perusakan.

Oleh karena masalah-masalah diatas penulis tertarik untuk membahas tentang pencemaran limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) oleh industri.

## 5.2 Pengertian Limbah B3

Definisi limbah B3 berdasarkan BAPEDAL (1995) ialah setiap bahan sisa (limbah) suatu kegiatan proses produksi yang mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3) karena sifat (toxicity, flammability, reactivity, dan corrosivity) serta konsentrasi atau jumlahnya yang baik secara langsung maupun tidak langsung dapat merusak, mencemarkan lingkungan, atau membahayakan kesehatan manusia.

Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung bahan berbahaya dan/atau beracun yang karena sifat dan/atau Konsentrasinya dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau dapat membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, kelangsungan hidup manusia serta makhluk hidup lainnya (Vallero, 2019).

Menurut PP No. 18 tahun 1999, yang dimaksud dengan limbah B3 adalah sisa suatu usaha dan atau kegiatan yang mengandung bahan berbahaya dan atau beracun yang karena sifat dan atau konsentrasinya dan atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan atau merusak lingkungan hidup dan atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, kelangsungan hidup manusia serta mahluk hidup lain.

Menurut RCRA (RESOURCE CONSERVATION and RECOVERY ACT) Limbah (Solid) atau gabungan berbagai limbah yang karena jumlah dan konsentrasinya, atau karena karakteristik fisik-kimia-dan daya infeksiusnya bersifat :

- Dapat mengakibatkan timbulnya atau menyebabkan semakin parahny penyakit yang tidak dapat disembuhkan atau penyakit yang melumpuhkan
- Menyebabkan timbulnya gangguan atau berpotensi menimbulkan gangguan terhadap kesehatan manusia atau lingkungan, apabila tidak diolah, disimpan, diangkut , dibuang atau dikelola dengan baik.

Untuk mendeteksi kandungan B3 dalam limbah dapat dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Uji kualitatif adalah *Screening test* atau *Fingerprint test*. Uji kualitatif ini untuk mengetahui karakteristik suatu limbah dengan maksud untuk mengantisipasi langkah-langkah dan penanganan limbah tersebut serta untuk membedakan/mengidentifikasi suatu jenis limbah dengan limbah lainnya. Uraian beberapa parameter dalam *Screening test / Fingerprint test* yang dapat dijadikan indikasi awal karakteristik limbah B3 dijelaskan sebagai berikut (Suresh, Bonda, Mohanty, & Nayak, 2018):

## 1. pH

Hasil pengukuran pH jika pH kurang lebih sama dengan 5 atau pH kurang lebih sama dengan 12,5, maka limbah tersebut dapat dinyatakan sebagai golongan limbah B3 karena bersifat korosif.

## 2. Reaktifitas Air

Reaktifitas air ini merupakan suatu parameter untuk menguji reaktifitas menggunakan air. Suatu limbah dapat dinyatakan bersifat reaktif apabila dalam pengujiannya terjadi gejala-gejala seperti adanya pelepasan gas, terbentuknya emulsi, perubahan temperatur dan lain-lain.

## 3. Pengoksidasi

Dalam pengujian pengoksidasi ini apabila suatu limbah menunjukkan adanya kandungan senyawa oksidan (oksidan positif), maka dapat diambil kesimpulan bahwa limbah tersebut mempunyai indikasi sebagai limbah B3. Karena apabila senyawa oksidan bercampur dengan senyawa organik dapat bereaksi secara spontan menghasilkan panas, gas atau bahkan menimbulkan ledakan.

## 4. Mudah Terbakar

Seperti kita ketahui bahwa salah satu karakteristik bahan kimia B3 adalah mudah meledak atau mudah terbakar. Sehingga ketika suatu limbah didekatkan pada suatu nyala api, apabila sampel langsung terbakar maka dapat diindikasikan limbah tersebut memiliki karakteristik mudah terbakar.

## 5. Kandungan Amonia

Dalam hal ini gas amonia perlu diuji karena termasuk gas yang beracun. Apabila suatu limbah mengandung gas amonia, dapat dinyatakan bahwa limbah tersebut kemungkinan termasuk kedalam limbah B3, karena apabila bercampur dengan suatu basa maka akan bersifat reaktif.

## 6. Kandungan Sianida

Sama halnya dengan amonia, gas sianida ini merupakan gas yang beracun dan mematikan. Apabila suatu limbah mengandung sianida

positif, maka dapat dinyatakan bahwa limbah tersebut kemungkinan termasuk kedalam limbah B3, karena apabila bercampur dengan suatu asam maka akan bersifat reaktif.

## 7. Kandungan Sulfida

Gas sulfida merupakan gas yang beracun dan mematikan. Apabila suatu limbah mengandung sianida positif, maka dapat dinyatakan bahwa limbah tersebut kemungkinan termasuk kedalam limbah B3, karena apabila bercampur dengan suatu asam maka akan bersifat reaktif.

Limbah B3 memiliki sifat mudah terbakar dan meledak, dan limbah tersebut bisa berupa gas, cair, cair ataupun padat dengan karakteristik yang berbeda.

Limbah yang bersifat reaktif adalah limbah-limbah yang mempunyai beberapa sifat berikut (Fenyehatan, n.d., 2017):

- 1) limbah yang pada keadaan normal tidak stabil dan dapat menyebabkan perubahan tanpa peledakan.
- 2) limbah yang dapat bereaksi hebat dengan air.
- 3) apabila tercampur air akan meledak, menghasilkan gas, uap, asap beracun yang membahayakan bagi manusia dan lingkungan.
- 4) limbah sianida, sulfida, atau amoniak yang dapat membahayakan kesehatan manusia.
- 5) limbah yang mudah meledak atau bereaksi pada suhu dan tekanan standar (25°C, 760 mmHG).
- 6) limbah yang menyebabkan kebakaran karena melepas/menerima oksigen.

Limbah beracun adalah limbah yang mengandung pencemar yang bersifat beracun bagi manusia atau lingkungan yang dapat menyebabkan kematian atau sakit yang serius apabila masuk ke dalam tubuh melalui pernapasan, kulit, atau mulut. Limbah yang menyebabkan infeksi ialah bagian tubuh manusia yang diamputasi dan cairan dari tubuh manusia yang terkena infeksi, limbah dari laboratorium atau limbah lainnya yang

terinfeksi kuman penyakit yang dapat menular. Limbah yang bersifat korosif adalah limbah yang bersifat :

- 1) menyebabkan iritasi pada kulit.
- 2) menyebabkan proses pengkaratan pada lempeng baja dengan laju korosi lebih besar dari 6,35mm/tahun dengan temperatur 55°C.
- 3) mempunyai pH sama atau kurang dari 2 untuk limbah bersifat asam atau lebih besar dari 12,5 untuk bersifat basa.

**Berdasarkan sumbernya, limbah B3 dapat diklasifikasikan menjadi** (Holt & Berge, 2018):

- a) *Primary sludge*, yaitu limbah yang berasal dari tangki sedimentasi pada pemisahan awal dan banyak mengandung biomassa senyawa organik yang stabil dan mudah menguap.
- b) *Chemical sludge*, yaitu limbah yang dihasilkan dari proses koagulasi dan flokulasi
- c) *Excess activated sludge*, yaitu limbah yang berasal dari proses pengolahan dengan lumpur aktif sehingga banyak mengandung padatan organik berupa lumpur dari hasil proses tersebut.
- d) *Digested sludge*, yaitu limbah yang berasal dari pengolahan biologi dengan digested aerobic maupun anaerobic di mana padatan/lumpur yang dihasilkan cukup stabil dan banyak mengandung padatan organik.

### 5.3 Karakteristik limbah B3

Secara konvensional terdapat tujuh kelas bahan berbahaya, yaitu (Suresh et al., 2018):

1. **Flammable (mudah terbakar)**, yaitu bahan padat, cair, uap, atau gas yang menyala dengan mudah dan terbakar secara cepat bila dipaparkan pada sumber nyala. misalnya: jenis pelarut ethanol, gas hidrogen, methane



(a) Limbah yang berupa cairan

Limbah yang berupa cairan akan mudah terbakar apabila:

- Mengandung alcohol kurang dari 24% volume dan mempunyai titik nyala kurang dari 60°C
- Terjadi kontak dengan api, percikan api, atau sumber nyala lain pada tekanan udara 760mmHg

(b) Limbah berupa padatan

- Limbah pada temperatur dan tekanan standar (25°C, 760mmHg) mudah menyebabkan kebakaran, seperti melalui gesekan, penyerapan uap air, atau perubahan kimia secara spontan. Limbah padat apabila terbakar dapat menyebabkan kebakaran yang terus menerus dalam waktu lama. Apabila nilai titik nyala limbah < 40°C, berarti karakteristik mudah terbakar

(c) Limbah yang bertekanan mudah terbakar

(d) Limbah pengoksidasi

- Apabila waktu pembakaran limbah sama atau lebih pendek dari waktu pembakaran senyawa standar, berarti karakteristik mudah terbakar.

2. **Explosive (mudah meledak)**, yaitu materi yang dapat meledak karena adanya kejutan, panas atau mekanisme lain, misalnya dinamit.

3. **Corrosive (korosif)**, bahan padat atau cair yang dapat membakar atau merusak jaringan kulit bila berkontak dengannya.

Limbah korosif adalah limbah yang mempunyai salah satu sifat-sifat berikut:

- Menyebabkan iritasi (terbakar) pada kulit
- Menyebabkan proses pengkaratan pada lempeng baja (SAE 1020) dengan laju korosi lebih besar dari 6,35 mm/tahun dengan temperature pengujian 55°C
- Mempunyai pH sama atau kurang dari 2 untuk limbah bersifat asam atau lebih besar dari 12,5 untuk yang bersifat basa

4. **Reaktif**, Limbah reaktif adalah limbah yang menyebabkan kebakaran karena melepaskan atau menerima oksigen atau limbah organik peroksida yang tidak stabil dalam suhu tinggi. misalnya : logam natrium

Limbah ini mempunyai sifat-sifat berikut:

- Pada keadaan normal, tidak stabil dan dapat menyebabkan perubahan tanpa peledakan
  - Dapat bereaksi hebat dengan air
  - Apabila bercampur dengan air berpotensi menimbulkan ledakan, menghasilkan gas, uap, atau asap beracun dalam jumlah yang membahayakan bagi kesehatan manusia dan lingkungan
  - Merupakan limbah sianida, sulfide, atau amoniak yang pada kondisi pH antara 2 dan 12,5 dapat menghasilkan gas, uap, atau asap beracun dalam jumlah yang membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan
  - Mudah meledak atau bereaksi pada suhu dan tekanan standar (25°C, 760mmHg)
  - Menyebabkan kebakaran karena melepas atau menerima oksigen atau limbah organik peroksida yang tidak stabil dalam suhu tinggi
5. **Infeksius**, bahan padat atau cair yang dapat menginfeksi lingkungan atau makhluk hidup di sekitarnya, misalnya : jarum suntik, sisa obat-obatan
6. **Beracun**, Limbah beracun adalah limbah yang mengandung pencemaran dan bersifat beracun bagi manusia atau lingkungan. Limbah B3 dapat menyebabkan kematian atau sakit yang serius apabila masuk ke dalam tubuh, baik melalui pernafasan, kulit, maupun mulut.

#### 5.4 Sumber Limbah Bahan berbahaya dan Beracun (B3)

Limbah B3 menurut sumbernya (PP.05/1999):

1. Sumber Tidak Spesifik (berdasarkan Lampiran I, tabel 1, PP 101 /2014):  
Limbah B3 yang berasal bukan dari proses utamanya, tetapi berasal

dari kegiatan pemeliharaan alat, pencucian, inhibitor korosi, pelarutan kerak, pengemasan, dll. Contohnya adalah asap kendaraan bermotor dan asap dari cerobong pabrik.

2. Sumber Spesifik (PP 101/2014): Limbah B3 sisa proses suatu industri atau kegiatan tertentu. Contohnya merkuri, arsen, dan deterjen.
3. Bahan kimia kadaluarsa : Tumpahan, sisa kemasan, buangan produk yang tidak memenuhi spesifikasi. Limbah ini berasal dari produk yang tidak memenuhi spesifikasi yang ditentukan atau tidak dapat dimanfaatkan kembali. Limbah ini memerlukan pengolahan, hal yang sama juga berlaku.

### 5.5 Bahan-bahan yang mengandung B3 dalam rumah tangga

Pada mulanya, banyak orang yang menyambut gembira dengan penemuan bahan-bahan dan senyawa kimia. Dengan berjalannya waktu, ternyata ditemukan pula dampak negatifnya. Untuk itu, limbah B3 dan B3 perlu dikelola dengan baik dan benar, baik pada saat masih digunakan maupun setelah tidak digunakan lagi.

#### Limbah Cair Rumah Tangga

Rumah adalah tempat tinggal dan berfungsi sebagai tempat pembinaan anggota. Segala hal yang berkaitan dengan aktifitas manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya di rumah tangga diharapkan dapat dikelola dengan baik. Dengan demikian, dampak dari limbah B3 di dalam rumah tangga dapat dikelola dengan baik. Oleh karena itu, setiap orang mempunyai hak yang sama atas lingkungan hidup yang baik dan sehat.

Sumber sampah di dalam rumah tangga	
Kamar tidur: kaleng hairspray, kaleng obat nyamuk, lampu TL, tisu, kapas, botol/wadah kosmetik, abu, dan debu	Kamar mandi/cuci: pembungkus sabun, wadah sabun cair, pembungkus shampoo, wadah pasta gigi, wadah deterjen, dan wadah pemutih pakaian

Ruang keluarga: bekas baterai, spidol/ tinta bekas, kaleng obat nyamuk, lampu TL, abu, debu, sisa dan pembungkus makanan, kertas, serta obat kadaluarsa	Ruang tamu: lampu TL, abu, debu, sisa dan pembungkus makanan serta kertas
Dapur: sisa dan pembungkus makanan, lampu TL, botol/wadah sabun cuci, wadah minyak tanah dan debu	Garasi: oli bekas, kaleng/wadah pembersih mobil, debu, aki bekas
Ruang makan: sisa dan pembungkus makanan dan debu	Taman/kebun: daun-daun, kertas, plastic, dan pembungkus makanan

Limbah cair rumah tangga atau domestik adalah air buangan yang berasal dari penggunaan untuk kebersihan yaitu gabungan limbah dapur, kamar mandi, toilet, cucian, dan sebagainya. Komposisi limbah cair rata-rata mengandung bahan organik dan senyawa mineral yang berasal dari sisa makanan, urin, dan sabun. Sebagian limbah rumah tangga berbentuk suspensi, lainnya dalam bentuk bahan terlarut. Di kota besar misalnya, beban organik (organic load) limbah cair domestik dapat mencapai sekitar 70% dari beban organik total limbah cair yang ada dikota tersebut. Limbah cair rumah tangga memiliki karakteristik yaitu TSS 25-183 mg/l, COD 100-700 mg/l, BOD 47-466 mg/l, Total Coliforms 56 - 8,03x10<sup>7</sup> CFU/100 ml. pengolahan limbah cair rumah tangga khususnya grey water secara biologi-fisika dengan mengabungkan metode aerasi dan filtrasi kemudian dilanjutkan dengan desinfeksi ultra violet dari sinar matahari. Dari hasil ini diharapkan limbah cair hasil pengolahan dapat memenuhi baku mutu limbah cair dalam beberapa parameter. (.,Yunita Muliana 2013)

Salah satu parameter kualitas air adalah kandungan bakteriologis. Diantara faktor penyebab meningkatnya kandungan bakteriologis dalam air (SGL) adalah limbah domestic. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 736/MENKES/PER/VI/2010 tentang tata laksana pengawasan air

minum, air minum adalah air yang melalui proses pengolahan yang syarat kesehatan atau tanpa proses pengolahan dan dapat langsung diminum, dan air bersih yang digunakan untuk kebutuhan rumah tangga harus memenuhi syarat- syarat tertentu baik secara fisik, biologi, maupun kimia.

Pada kenyataannya air tanah yang tersedia untuk dipergunakan tidak selalu memenuhi standar kesehatan. Terlebih lagi bagi masyarakat yang menggunakan air yang berasal dari sumur. Jika air tersebut berasal dari sumur yang letaknya dekat dengan sumber limbah, maka air tersebut akan lebih mudah terkontaminasi oleh cemaran atau polutan. Sumber pencemaran terdiri dari polutan alami (mineral dan mikroorganisme) serta polutan buatan. Polutan buatan dapat berupa residu (sisa) bahan kimia yang dibuat oleh manusia, sedangkan polutan buatan dapat berasal dari limbah rumah tangga, industri maupun pertanian. Zat-zat pencemar, terutama yang dapat menghasilkan bakteri pathogen sangat berbahaya karena dapat menyebabkan munculnya berbagai jenis penyakit. Kandungan bakteri dalam air sebenarnya tidak berbahaya jika tidak melampaui batas ambang. Masalah pencemaran air tanah secara bakteriologis akan muncul ketika jumlah bakteri yang terkandung dalam sumber air bersih melebihi batas aman. Banyak faktor yang memungkinkan meningkatnya kandungan bakteri pathogen dalam air tanah seperti jarak sumber pencemar yang terlalu dekat dengan sumber air tanah dalam hal ini sumur gali (SGL), kondisi fisik dan konstruksi sumur gali yang tidak memenuhi syarat, dan perilaku masyarakat. (Gufuran & Mawardi, 2019)

Ketika sumber-sumber air tersebut tercemar maka berbagai kegiatan manusia yang membutuhkan air seperti untuk irigasi pertanian, bahan baku air minum, sebagai saluran pembuangan air hujan dan air limbah, bahkan sebenarnya berpotensi sebagai objek wisata akan terganggu. Dari sekian banyak sumber air yang ada, air tanah merupakan sumber air yang sangat perlu untuk dijaga kualitasnya, karena kebanyakan masyarakat menggunakan air tanah yang berasal dari sumur gali atau sumur bor untuk kebutuhan sehari-hari seperti, untuk air minum, mengolah makanan, dan lain sebagainya (Priangga, 2013).

## 5.6 Gejala Umum Pencemaran Lingkungan Akibat Limbah Industri

- Jangka Pendek

Air sungai atau air sumur sekitar lokasi industri pencemar, yang semula berwarna jernih, berubah menjadi keruh berbuih dan berbau busuk, sehingga tidak layak dipergunakan lagi oleh warga masyarakat sekitar untuk mandi, mencuci, apalagi untuk bahan baku air minum (Kalogiannidou, Nikolakopoulou, & Komilis, 2018).

Ditinjau dari segi kesehatan, kesehatan warga masyarakat sekitar dapat timbul penyakit dari yang ringan seperti gatal-gatal pada kulit sampai yang berat berupa cacat genetic pada anak cucu dan generasi berikut.

Terjadinya penurunan kualitas air permukaan di sekitar daerah-daerah industri.

Kelangkaan air tawar semakin terasa, khususnya di musim kemarau, sedangkan di musim penghujan cenderung terjadi banjir yang melanda banyak daerah yang berakibat merugikan akibat kondisi ekosistemnya yang telah rusak.

Temperatur udara maksimal dan minimal sering berubah-ubah, bahkan temperatur tertinggi di beberapa kota seperti Jakarta sudah mencapai 37 derajat celsius.

Terjadi peningkatan konsentrasi pencemaran udara seperti CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, dan debu.

- Jangka Panjang

Penyakit akibat pencemaran ada yang baru muncul sekian tahun kemudian setelah cukup lama bahan pencemar terkontaminasi dalam bahan makanan menurut daur ulang ekologi, seperti yang terjadi pada kasus penyakit minaimata sekitar 1956 di Jepang. terdapat lebih dari 100 orang meninggal atau cacat karena mengkonsumsi ikan yang berasal dari Teluk Minamata. Teluk ini tercemar merkuri yang berasal dari sebuah pabrik plastik. Bila merkuri masuk ke dalam tubuh manusia melalui saluran

pencernaan, dapat menyebabkan kerusakan akut pada ginjal sedangkan pada anak-anak dapat menyebabkan Pink Disease/acrodynia, alergi kulit dan kawasaki disease/mucocutaneous lymph node syndrome (Pourzamani et al., 2019).

## **5.7 Dampak Pencemaran Limbah Bahan berbahaya dan Beracun (B3) Industri**

### **1. Limbah industri pangan**

Sektor Industri/usaha kecil pangan yang mencemari lingkungan antara lain : tahu, tempe, tapioka dan pengolahan ikan (industri hasil laut). Limbah usaha kecil pangan dapat menimbulkan masalah dalam penanganannya karena mengandung sejumlah besar karbohidrat, protein, lemak, garam-garam, mineral, dan sisa-sisa bahan kimia yang digunakan dalam pengolahan dan pembersihan. Sebagai contohnya limbah industri tahu, tempe, tapioka industri hasil laut dan industri pangan lainnya, dapat menimbulkan bau yang menyengat dan polusi berat pada air bila pembuangannya tidak diberi perlakuan yang tepat (Li, Ma, Huang, & Jiang, 2018).

Air buangan (efluen) atau limbah buangan dari pengolahan pangan dengan Biological Oxygen Demand (BOD) tinggi dan mengandung polutan seperti tanah, larutan alkohol, panas dan insektisida. Apabila efluen dibuang langsung ke suatu perairan akibatnya mengganggu seluruh keseimbangan ekologi dan bahkan dapat menyebabkan kematian ikan dan biota perairan lainnya.

### **2. Limbah industri kimia dan bahan bangunan**

Industri kimia seperti alkohol, parfum & minyak pelumas (oli) dalam proses pembuatannya membutuhkan air sangat besar, mengakibatkan pula besarnya limbah cair yang dikeluarkan ke lingkungan sekitarnya. Air limbahnya bersifat mencemari karena didalamnya terkandung zat kimia berbahaya, senyawa organik dan anorganik baik terlarut maupun tersuspensi serta senyawa tambahan yang terbentuk selama proses fermentasi berlangsung (Wang et al., 2019).

Industri ini mempunyai limbah cair selain dari proses produksinya juga, air sisa pencucian peralatan, limbah padat berupa onggokan hasil perasan, endapan  $\text{Ca SO}_4$ , gas berupa uap alkohol. Kategori limbah industri ini adalah limbah bahan berbahaya beracun (B3) yang mencemari air dan udara.

Gangguan terhadap kesehatan yang dapat ditimbulkan efek bahan kimia toksik (Vallero, 2019):

- a. Keracunan yang akut, yakni keracunan akibat masuknya dosis tertentu kedalam tubuh melalui mulut, kulit, pernafasan dan akibatnya dapat dilihat dengan segera, misalnya keracunan  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$  dalam dosis tinggi. Dapat menimbulkan lemas dan kematian. Keracunan Fenol dapat menimbulkan sakit perut dan sebagainya.
- b. Keracunan kronis, sebagai akibat masuknya zat-zat toksis kedalam tubuh dalam dosis yang kecil tetapi terus menerus dan berakumulasi dalam tubuh, sehingga efeknya baru terasa dalam jangka panjang misalnya keracunan timbal, arsen, raksa, asbes dan sebagainya.

Industri fermentasi seperti alkohol disamping bisa membahayakan pekerja apabila menghirup zat dalam udara selama bekerja apabila tidak sesuai dengan Threshold Limit Value (TLV) gas atau uap beracun dari industri juga dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat sekitar.

Kegiatan lain sektor ini yang mencemari lingkungan adalah industri yang menggunakan bahan baku dari barang galian seperti batako putih, genteng, batu kapur/gamping dan kerajinan batu bata. Pencemaran timbul sebagai akibat dari penggalian yang dilakukan terus-menerus sehingga meninggalkan kubah-kubah yang sudah tidak mengandung hara sehingga apabila tidak direklamasi tidak dapat ditanami untuk ladang pertanian.

### 3. Limbah industri sandang kulit dan aneka

Sektor sandang dan kulit seperti pencucian batik, batik printing, penyamakan kulit dapat mengakibatkan pencemaran yang beresiko tinggi terhadap lingkungan karena dalam kegiatannya proses pencucian terhadap



bahan-bahan bakunya memerlukan air sebagai mediumnya dalam jumlah yang besar. Proses ini menimbulkan air buangan (bekas Proses) yang besar pula, dimana air buangan mengandung sisa-sisa warna, BOD tinggi, kadar minyak tinggi dan beracun (mengandung limbah B3 yang tinggi).

#### 4. Limbah industri logam dan elektronika

Bahan buangan yang dihasilkan dari industr besi baja seperti mesin bubut, cor logam dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Sebagian besar bahan pencemarannya berupa debu, asap dan gas yang mengotori udara sekitarnya. Selain pencemaran udara oleh bahan buangan, kebisingan yang ditimbulkan mesin dalam industri baja (logam) mengganggu ketenangan sekitarnya. Kadar bahan pencemar yang tinggi dan tingkat kebisingan yang berlebihan dapat mengganggu kesehatan manusia baik yang bekerja dalam pabrik maupun masyarakat sekitar.

Walaupun industri baja/logam tidak menggunakan larutan kimia, tetapi industri ini mencemari air karena buangannya dapat mengandung minyak pelumas dan asam-asam yang berasal dari prosespicklinguntuk membersihkan bahan plat, sedangkan bahan buangan padat dapat dimanfaatkan kembali (Singh, Duan, Ogunseitn, Li, & Tang, 2019).

Bahaya dari bahan-bahan pencemar yang mungkin dihasilkan dari proses-proses dalam industri besi-baja/logam terhadap kesehatan yaitu (Holt & Berge, 2018):

- Debu, dapat menyebabkan iritasi, sesak nafas
- Kebisingan, mengganggu pendengaran, menyempitkan pembuluh darah, ketegangan otot, menurunnya kewaspadaan, kosentrasi pemikiran dan efisiensi kerja.
- Karbon Monoksida (CO), dapat menyebabkan gangguan serius, yang diawali dengan napas pendek dan sakit kepala, berat, pusing-pusing pikiran kacau dan melemahkan penglihatan dan pendengaran. Bila keracunan berat, dapat mengakibatkan pingsan yang bisa diikuti dengan kematian.

- Karbon Dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dapat mengakibatkan sesak nafas, kemudian sakit kepala, pusing-pusing, nafas pendek, otot lemah, mengantuk dan telinganya berdenging.
- Belerang Dioksida ( $\text{SO}_2$ ), pada konsentrasi 6-12 ppm dapat menyebabkan iritasi pada hidung dan tenggorokan, peradangan lensa mata (pada konsentrasi 20 ppm), pembengkakan paru-paru/celah suara.
- Minyak pelumas, buangan dapat menghambat proses oksidasi biologi dari sistem lingkungan, bila bahan pencemar dialirkan kesungai, kolam atau sawah dan sebagainya.
- Asap, dapat mengganggu pernafasan, menghalangi pandangan, dan bila tercampur dengan gas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , maka akan memberikan pengaruh yang membahayakan seperti yang telah diuraikan diatas.

## 5. Industri Karet

Proses pengolahan industri karet juga menghasilkan limbah cair, limbah padat dan gas buang serta kebisingan. Bahan baku berpengaruh terhadap kualitas dan kuantitas limbah yang dihasilkan. Kualitas dan kuantitas bahan baku semakin jelek/kotor maka air yang dibutuhkan untuk mencuci akan semakin banyak, dengan demikian air yang terbuang juga semakin banyak dan tentu saja debit air limbah juga semakin bertambah besar. Produksi karet menghasilkan limbah cair  $\pm 400 \text{ m}^3$  per hari. Limbah cair yang keluar dari pabrik dikumpulkan dalam kolam penampungan dan setelah 3 hari limbah cair tersebut baru dibuang ke sungai. Inilah yang menyebabkan bau dan timbul gas amonia yang lebih banyak. Limbah cair pabrik karet brown crepe berwarna keruh dan berbau busuk karena adanya protein yang membusuk, sehingga menambah beban pencemar dari limbah cair tersebut dan mencemari lingkungan, baik pencemaran udara maupun air. Nilai COD dan BOD pada limbah cair karet brown crepe tinggi karena disebabkan oleh adanya bahan-bahan organik dari limbah cair karet sehingga perlu pengolahan (Sutyasmi & Setyorini, 2018)

Pengolahan limbah cair pada industri karet umumnya menggunakan rubber trap tanpa pengolahan kimia, sehingga limbah cair hanya lewat saja, karena over capacity sehingga tidak memenuhi baku mutu limbah cair yang sudah ditetapkan oleh masing-masing pemerintah daerah. Untuk itu perlu dicoba pengolahan dengan bahan kimia (flokulasikoagulasi) pada limbah cair brown crepe dan adsorpsi agar hasilnya memenuhi persyaratan yang berlaku. Ada tiga cara pengolahan limbah cair industry karet yang digunakan yaitu :

1. Pengolahan Limbah Cair dengan Koagulasi dan Flokulasi Dilanjutkan Adsorpsi
2. Pengolahan Limbah Cair dengan Saringan Pasir,
3. Pengolahan Limbah Cair dengan Koagulasi–flokulasi dan Saringan Pasir

## 5.8 Upaya Pencegahan Pencemaran Limbah (B3) Industri

Upaya-upaya pencegahan yang harus dilakukan dalam mengatasi Pencemaran limbah B3 industri adalah sebagai berikut:

- Mengatur sistem pembuangan industri sehingga tidak mencemari lingkungan
- Menempatkan industri atau pabrik terpisah atau jauh dari pemukiman penduduk
- Melakukan pengawasan atau penggunaan beberapa jenis pestisida, insektisida dan bahan kimia lain yang berpotensi menjadi penyebab pencemaran
- Melakukan penghijauan
- Memberikan sanksi atau hukuman secara tegas terhadap pelaku yang mencemari lingkungan
- Pengaturan pembuangan limbah dengan IPAL (Instalasi Pembuangan Air Limbah) agar tidak mencemari lingkungan

## 5.9 Kesimpulan

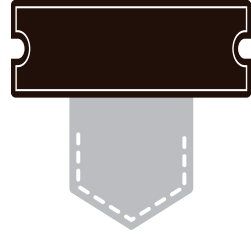
1. Limbah B3 industri dapat menghasilkan bahan toksik yang berbahaya bagi lingkungan
2. Limbah industri yang mengandung bahan pencemar akan berpengaruh terhadap lingkungan baik jangka pendek maupun jangka panjang
3. Limbah industri berdampak pada lingkungan dan kesehatan manusia
4. Pencegahan pencemaran limbah B3 industri dapat dilakukan dengan Mengatur sistem pembuangan industri sehingga tidak mencemari lingkungan
  - Menempatkan industri atau pabrik terpisah atau jauh dari pemukiman penduduk
  - Melakukan pengawasan atau penggunaan beberapa jenis pestisida, insektisida dan bahan kimia lain yang berpotensi menjadi penyebab pencemaran
  - Melakukan penghijauan
  - Memberikan sanksi atau hukuman secara tegas terhadap pelaku yang mencemari lingkungan
  - Pengaturan pembuangan limbah dengan IPAL (Instalasi Pembuangan Air Limbah) agar tidak mencemari lingkungan
5. Penanggulangannya dapat dilakukan dengan pengolahan limbah selain itu dalam mengatasi pencemaran sangat di perlukannya peran pemerintah dan kesadaran masyarakat.

## Daftar Pustaka

- . Y. M. R. P. B. (2013). Pengolahan Limbah Cair Domestik untuk Penggunaan Ulang (Water Reuse). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.26418/jtlb.v1i1.1990>
- Fenyehatan, A. T. (n.d.). *Ikatan Ahli Teknik Fenyehatan*.
- Gautam, P., Kumar, S., & Lokhandwala, S. (2019). Advanced Oxidation Processes for Treatment of Leachate from Hazardous Waste

- Landfill: A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117639>
- Gufran, M., & Mawardi, M. (2019). Dampak Pembuangan Limbah Domestik terhadap Pencemaran Air Tanah di Kabupaten Pidie Jaya. *Jurnal Serambi Engineering*, 4(1), 416. <https://doi.org/10.32672/jse.v4i1.852>
- Holt, S. P., & Berge, N. D. (2018). SC. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.214>
- Kalogiannidou, K., Nikolakopoulou, E., & Komilis, D. (2018). Generation and composition of waste from medical histopathology laboratories. *Waste Management*, 79, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.012>
- KEMEN LH. (2014). *No Title*.
- Li, W., Ma, Z., Huang, Q., & Jiang, X. (2018). Distribution and leaching characteristics of heavy metals in a hazardous waste incinerator. *Fuel*, 233(May), 427–441. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.041>
- Mallongi, A.; Rauf, A.U.; Astuti, R.D.P.; Palutturi, S.; Ishak, H., (2023). Ecological and human health implications of mercury contamination in the coastal water. *Global J. Environ., Sci. Manage.*, 9(2): 1-14.
- Muliana Yunita, Pengolahan limbah cair domestik. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v1i1.1990.2013>
- Nadal, M., García, F., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L. (2019). Metals in biological tissues of the population living near a hazardous waste incinerator in Catalonia , Spain : Two decades of follow-up. *Environmental Research*, 176(July), 108578. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108578>
- Pourzamani, H., Darvishmotevalli, M., Akhyari, S. H., Hadi, S., Momeni, F., Bakhtiyari, S. G., & Fadaei, S. (2019). Graphical abstract. *MethodsX*. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.012>

- Singh, N., Duan, H., Ogunseitan, O. A., Li, J., & Tang, Y. (2019). Mobile phones SC Smart phones. *Journal of Hazardous Materials*, 120898. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120898>
- Suresh, S. S., Bonda, S., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2018). SC. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.003>
- Sutyasmi, S., & Setyorini, I. (2018). Cara pengolahan limbah cair brown crepe untuk menurunkan bahan pencemar reduce pollutants. 34(2), 61–68.
- Vallero, D. A. (2019). *Hazardous Wastes*. 585–630. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00031-1>
- Wang, C., Xu, J., Yang, Z., Zhang, Z., & Cai, Z. (2019). SC. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.020>



## PROFIL PENULIS



*Prof. Anwar Mallongi, SKM.,MSc.,Ph.D* Lahir di Pare-pare, Sulawesi Selatan pada tanggal 16 Agustus 1974. Menamatkan Sarjana Kesehatan Masyarakat pada Departemen Kesehatan Lingkungan, Universitas Hasanuddin Makassar tahun 1998, dan menjadi dosen tetap pada jurusan yang sama sejak tahun 2000 hingga saat ini. Program Master bidang Urban Environmental tamat 2004 di Wageningen University Research Centre Joint Program With IHS-Erasmus Rotterdam, The Netherlands. Selanjutnya Menamatkan Program Ph.D bidang Sanitary Engineering, Environmental Technology di Faculty of Public Health Mahidol University, Thailand, Tamat 2014. Tahun 2020 mencapai Gelar sebagai Guru Besar FKM Unhas dengan No Anggota : 405/SA-UH/2020.

Oral Presenter pada Asia Pacific Academic Consortium for Public Health (APACPH) di Hanoi Vietnam 2008, Bali 2010 dan Colombo Sri Lanka 2012. Selanjutnya Presentase International ITMAR di Turkey dan ETAR di Bali. Konferensi International ICEOH Malaysia, dan IENC Khoen Kaen, Thailand. Key note speaker on International Seminar "Clean Water and Sustainable Sanitation", Invited speaker pada International Conference Turkey,"International Conference on Medical, Medicine and Health Sciences" 2022. Selain dosen tetap di Department Kesehatan Lingkungan

FKM UNHAS, penulis hingga saat ini aktif menerbitkan paper internasional dari berbagai hasil research bidang kesehatan lingkungan terindeks SCOPUS sebanyak 188 Artikel dan 580 Google Scholar.

Sedangkan buku-buku referensi yang telah ditulis adalah: Pengelolaan Limbah Padat Perkotaan (ISBN: 978-602-1384-41-1), Teknik Penyehatan Lingkungan (ISBN: 978-602-1364-11-4). Bahan Pencemar Toxic di Udara dan Upaya Pengendaliannya (ISBN: 978-602-1384-96-1), terbit 2015. Buku Current Issue Ilmu Kesehatan Lingkungan (ISBN: 978-602-6934-51-2) terbit 2016. Buku Dampak Limbah Cair dari Aktifitas Institusi dan Industri (ISBN: 978-602-5411-10-6) terbit 2017. Dan Buku Bahaya Pencemaran Limbah Dari Berbagai Aktifitas. (ISBN: 978-602-5775-13-0) terbit 2018. Dinamika Polutan dan Risiko Kesehatan Lingkungan (ISBN: 978-602-5411-45-8) terbit 2019 dan Penyakit Akibat Ekspose Kontaminan dan Potensi Risiko Kesehatan (ISBN: 978-602-5775-76-5) terbit 2019. Penilaian Risiko Mikroba, Bahan Kimia, dan Ekologi Terhadap Status Kesehatan ((ISBN: 978-623-236-186-7) terbit 2021), Pencemaran dari Industri dan Analisis Risiko Ekologi (ISBN: 978-623-236-187-4) Terbit 2021. Pemodelan sistem dinamis bidang kesehatan : (ISBN : 9786236913178) Terbit 2022.



*Dr. Ratna Dwi Puji Astuti, S.K.M.* Lahir di Jakarta pada tanggal 03 Agustus 1994. Menamatkan Sarjana Kesehatan Masyarakat pada Departemen Kesehatan Lingkungan, Universitas Indonesia tahun 2016 dan selesai menamatkan program Pendidikan percepatan magister dan doktoral di Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2022 dalam bidang ilmu kesehatan masyarakat. Pengalaman ilmiah luar negeri antara lain mengikuti training Environmental Monitoring and Modelling di Malaysia pada tahun 2019, online training Infectious Disease Transmission Models for decision makers



dari John Hopkins University USA tahun 2022, online training Measuring and Maximizing Impact of COVID-19 contact tracing dari John Hopkins University USA tahun 2022, dan online training COVID-19: Global Health Perspectives dari University of Melbourne Australia tahun 2022. Konferensi Internasional yang pernah diikuti sebagai pembicara antara lain 52<sup>nd</sup> Asia-Pacific Academic Consortium for Public Health (APACPH) conference, 13<sup>th</sup> Internasional Nursing Conference, 1<sup>st</sup> International conference on Safety and Public Health, 2<sup>nd</sup> International Modern Scientific Research Congress. Penulis hingga saat ini aktif menerbitkan artikel ilmiah di berbagai jurnal bereputasi Internasional (terindeks SCOPUS dan WEB OF SCIENCES) sebanyak 22 artikel. Saat ini penulis aktif sebagai *reviewer* di beberapa jurnal ilmiah bereputasi Internasional diantaranya *Environmental geochemistry and health*, *Plos One*, *Environment development and sustainability*, *Water and environment journal*, *chemosphere*, dan *Ain Shams Engineering Journal*, serta menjadi *review editor* di *Frontiers in Sustainable Ocean – Marine and Coastal Pollution*. Pengalaman kolaborasi internasional dalam bidang penelitian bersama *Graduate school of Public health Seoul National University, Republic of Korea* tahun 2021 – 2022.



**Dr. Annisa Utami Rauf, S.Pd.** Lahir di Ujung Pandang pada tanggal 26 Juni 1994. Menamatkan Sarjana di Departemen Kimia, Universitas Negeri Makassar tahun 2017 dan melanjutkan jenjang pendidikan Magister dan Doktoral di Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2022 dalam bidang Ilmu Kesehatan Masyarakat melalui beasiswa Pendidikan Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) Batch IV dari Kemenristekdikti. Pengalaman ilmiah luar negeri antara lain mengikuti training *Environmental Monitoring and Modelling* di Malaysia di tahun 2019, certified *American*

*Chemical Society (ACS) Reviewer Lab, Lean Six Sigma White Belt dan Project Management Essentials* dari *Management and Strategy Institute* di tahun 2020, serta berpengalaman dalam kolaborasi penelitian sebagai *research assistant* dengan institusi terkemuka di luar negeri diantaranya Gaza University, Palestina dan Seoul National University (SNU), Korea Selatan. Konferensi Internasional yang pernah diikuti sebagai pembicara antara lain 52<sup>nd</sup> Asia-Pacific Academic Consortium for Public Health (APACPH) conference, 13<sup>th</sup> Internasional Nursing Conference, 1<sup>st</sup> International conference on Safety and Public Health, 2<sup>nd</sup> International Modern Scientific Research Congress. Penulis saat ini aktif sebagai peneliti dan telah menerbitkan beberapa artikel bereputasi dan terindeks Scopus dan WOS dengan jumlah artikel sebanyak 21 artikel. Saat ini penulis juga menjadi ketua divisi *Health, Safety and Environment* di dauroom, sebuah inisiasi lokal di Kota Makassar untuk mendaur ulang sampah melalui konsep *circular economy*. Penulis juga aktif menjadi reviewer di beberapa jurnal ilmiah bereputasi diantaranya *Toxicological Research, Journal of Public Health Research, Journal of Applied Pharmaceutical Science, Journal of Applied Biology & Biotechnology* dan *Sustainable Water Resources Management*.



**Ernyasih, S.K.M. M.K.M.** Lahir di Jakarta pada tanggal 15 September 1980. Menamatkan Sarjana Kesehatan Masyarakat pada Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Muhammadiyah Jakarta tahun 2004 dan selesai menamatkan Magister di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia tahun 2012. Konferensi Internasional yang pernah diikuti sebagai pembicara antara lain *The 1<sup>st</sup> Muhammadiyah International Public Health and Medicine Conference, The 2<sup>nd</sup> Muhammadiyah International Public Health and Medicine Conference dan International Conference on Medical,*

*Medicine and Health Scences (ICMMH)*. Saat ini penulis aktif sebagai *editor* dalam *Jurnal terakreditasi sinta* di *Jurnal Kedokteran dan Kesehatan* dan menjadi *Editor in Chief* pada jurnal *Environmental Occupational Health and Safety Journal*. Penulis saat ini aktif menerbitkan paper international dari berbagai hasil research pada jurnal International bidang kesehatan lingkungan terindeks SINTA ataupun SCOPUS, antara lain berjudul “Faktor-faktor yang berhubungan dengan perilaku pencegahan COVID-19 mahasiswa FKM UMJ pada pandemi COVID-19 tahun 2020; Assessment of low-cost mercury absorbent to minimize the mercury environmental and health effects in Makassar coastal areas, terbit 2022.