

**RISIKO KESEHATAN  
DAN LINGKUNGAN  
AKIBAT PAJANAN  
POLUTAN DI UDARA**

# KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil Alamiin, dengan mengucapkan syukur kehadiran Allah Yang Maha Kuasa, akhirnya buku Risiko Kesehatan dan Lingkungan Akibat Paparan Polutan di Udara 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 penulis.

Buku referensi ini dibuat sebagai acuan dalam proses pembelajaran yang berhubungan dengan bahan pencemar udara baik bahan kimia gas maupun logam. Sebagai konsekwensinya dapat menimbulkan terjadinya risiko baik pada manusia dan juga pada Lingkungan. Perubahan bahan polutan toksik dan berbahaya dapat masuk diudara secara langsung, ke tanah, ke air maupun pada makanan maupun secara tidak langsung. Hal ini penting untuk dinilai dalam menentukan tingkat risiko dan upaya pengendaliannya, sehingga dalam buku ini juga diberikan metode penilaian risiko kesehatan dan lingkungan.

Materinya 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 7 Bab dengan masing-masing topik yang telah tersusun secara sistematis. Fokus penekanannya pada bahan kimia yang masuk keudara,

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 penilaian risiko kesehatan dan risiko ekologi, substansi bahan polutan pada media lingkungan udara, tanah, air dan makanan serta proses terjadinya proses infeksi atau pencemaran dari awal hingga akhir penilaian dampak risiko mikroba dan bahan kimia. 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, February 2023

Wassalam,

Penulis

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
<b>BAB 1 SUMBER POLUSI UDARA</b>	<b>1</b>
1.1 Definisi Polusi Udara	1
1.2 Sumber Utama Pencemaran Udara	2
1.2.1 Sumber diam/ tidak bergerak ( <i>Stationary Source</i> )	3
1.2.2 Sumber bergerak ( <i>Mobile Source</i> )	4
1.2.3 Sumber lokasi/ area ( <i>Area Source</i> )	5
1.2.4 Sumber alami ( <i>Natural Source</i> )	6
1.3 Jenis Partikulat di Udara Berdasarkan Ukuran	6
1.3.1 Partikulat PM <sub>10</sub>	6
1.3.2 Partikulat PM <sub>2,5</sub>	7
1.3.3 Partikulat PM <sub>1</sub>	8
1.4 Risiko Kesehatan dan Penyakit Akibat Pencemaran Udara	9
1.5 Kesimpulan	12
Daftar Pustaka	13

<b>BAB 2</b>	<b>PARTIKULAT LOGAM</b>	<b>23</b>
2.1	Definisi Logam	23
2.2	Jenis- Jenis Logam Berbahaya	24
2.2.1	Kadmium (Cd)	24
2.2.2	Timbal (Pb)	26
2.2.3	Kromium (Cr)	30
2.2.4	Merkuri Hg	32
2.3	Teknik Pengambilan Sampel Logam di Udara	35
2.3.1	Laju Alir ( <i>Flow rate</i> )	35
2.3.2	Media Filter	35
2.4	Risiko dan Kerusakan Ekologis	36
2.5	Faktor Toksisitas Paparan Logam di Udara	38
2.5.1	Umur	38
2.5.2	Aktifitas	39
2.5.3	Status Gizi	39
2.5.4	Data Konsumsi	40
2.5.5	Jenis Kelamin	41
2.5.6	Pekerjaan	41
2.6	Kesimpulan	44
	Daftar Pustaka	44
<b>BAB 3</b>	<b>POLISIKLIK AROMATIK HIDROKARBON (PAH)</b>	<b>55</b>
3.1	Definisi PAH	55
3.2	Sumber dan Jejak PAH di Udara	56
3.3	Efek Kesehatan dari Paparan PAH	58
3.4	Upaya Pencegahan Paparan PAH	62
3.5	Kesimpulan	63
	Daftar Pustaka	64

<b>BAB 4</b>	<b>PENCEMARAN CHLORO FLUORO CARBONS</b>	
	<b>DI UDARA DAN UPAYA PENANGGULANGANNYA</b>	<b>67</b>
4.1	Pendahuluan	67
1.2	Karakteristik Cloro Fluoro Carbon (CFC)	68
4.3	Sumber – sumber CFC	71
4.4.	Keberadaan CFC di udara	71
4.5	Kegunaan dan Manfaat CFC	73
4.6	Dampak Lingkungan Pencemaran CFC	74
4.7	Dampak Kesehatan Pencemaran CFC	75
4.8	Upaya-upaya Penurunan CFC Menuju Green City	76
	Daftar Pustaka	79
<b>BAB 5</b>	<b>PENCEMARAN OZON DI UDARA DAN UPAYA</b>	
	<b>PENANGGULANGANNYA</b>	<b>83</b>
5.1	Pendahuluan	83
5.2	Karakteristik Ozon (O <sub>3</sub> )	85
5.3	Sumber-Sumber Pencemar Ozon (O <sub>3</sub> )	86
5.4	Keberadaan Ozon (O <sub>3</sub> ) di Udara	87
5.5	Kegunaan dan Manfaat Ozon (O <sub>3</sub> )	88
5.6	Dampak Lingkungan Pencemaran Ozon (O <sub>3</sub> )	90
5.7	Dampak Kesehatan Pencemaran Ozon (O <sub>3</sub> )	91
5.8	Upaya-Upaya Penurunan Pencemaran Ozon (O <sub>3</sub> )	94
	Daftar Pustaka	99
<b>BAB 6</b>	<b>PENCEMARAN SULFUR DIOKSIDA DI UDARA DAN</b>	
	<b>PENANGGULANGANNYA</b>	<b>103</b>
6.1	Pendahuluan	103
6.2	Karakteristik SO <sub>2</sub>	105
6.3	Sumber – Sumber SO <sub>2</sub>	106
6.4	Keberadanan SO <sub>2</sub> di Udara	108
6.5	Kegunaan dan Manfaat SO <sub>2</sub>	111

6.6	Dampak Lingkungan Pencemaran SO <sub>2</sub>	112
6.7	Dampak Kesehatan Pencemaran SO <sub>2</sub>	115
6.8	Upaya - Upaya Penurunan SO <sub>2</sub> Menuju Green City	116
	Daftar Pustaka	122

<b>BAB 7</b>	<b>DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP LINGKUNGAN DAN KESEHATAN DI WILAYAH PESISIR</b>	<b>125</b>
7.1	Pendahuluan	125
7.2	Perubahan Iklim Global	128
7.3	Identifikasi Transport dan Transfer Akumulasi Bahan Pencemar	131
7.4	Dampak pada Lingkungan	133
7.5	Dampak Kesehatan dan Penyakit	136
7.6	Model Penanganan yang Diaplikasikan	140
7.7	Potensi Hambatan dan Keberhasilan	144
	Daftar Pustaka	145
	<b>PROFIL PENULIS</b>	<b>149</b>

# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b>	Beberapa Sumber Pencemaran Udara (NPS U.S Government, 2018).	3
<b>Gambar 1.2</b>	Efek dan langkah pengendalian kualitas udara (Purushothaman et al., 2021).	12
<b>Gambar 2.2</b>	Skema dan alur logam kromium mencapai sistem manusia.	31
<b>Gambar 2.3</b>	Penyerapan logam berat di tumbuhan (Bhat et al., 2019).	37
<b>Gambar 3.1</b>	Konsentrasi rata-rata PAH berdasarkan sumber emisi (WHO, 2021).	57
<b>Gambar 3.2</b>	Jenis-jenis senyawa PAH (Abdel-Shafy & Mansour, 2016).	60
<b>Gambar 4.1</b>	Tingkat Emisi CFC – 12 and Kenaikan Atmosphere	70
<b>Gambar 4.2</b>	Mekanisme Pemanasan Global Akibat Tiga CFC	72
<b>Gambar 5.1</b>	Keberadaan Ozon di atmosfer (EPA, 2003)	88





# DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Kategori Pb dalam darah orang dewasa	30
<b>Tabel 2.2</b>	Batas Konsentrasi Logam di Udara	43
<b>Tabel 2.3</b>	<i>Reference doses</i> (RfD) dan <i>Cancer Slope Factor</i> (CSF) oleh USEPA, IRIS dan DEA	43
<b>Tabel 5.1</b>	Konsentrasi Maksimum SO <sub>2</sub> dengan Waktu	111
<b>Tabel 5.2</b>	Sistem <i>Scrubbing</i> Cerobong Asap	118



# BAB 1

## SUMBER POLUSI UDARA

### 1.1 Definisi Polusi Udara

*World Health Organization* memperkirakan bahwa polusi udara ambien berkontribusi terhadap kematian 165.8 per 100.000 populasi di Asia Tenggara-Mediterrania dan menjadi yang tertinggi kedua setelah Afrika dengan 190.8 per 100.000 populasi (WHO, 2018). Sebagian besar kematian tersebut diakibatkan oleh dampak penyakit kardiovaskular gangguan pernapasan dan kanker. Pencemaran udara berkontribusi pada kematian 85.0 per 100.000 populasi di Indonesia pada tahun 2017 dan naik hingga 112.4 per 100.000 populasi di tahun 2019 (WHO, 2019). Kontaminasi air, tanah, masalah sanitasi dan *hygiene* menyebabkan kematian 7,1 per 100.000 populasi di tahun 2019.

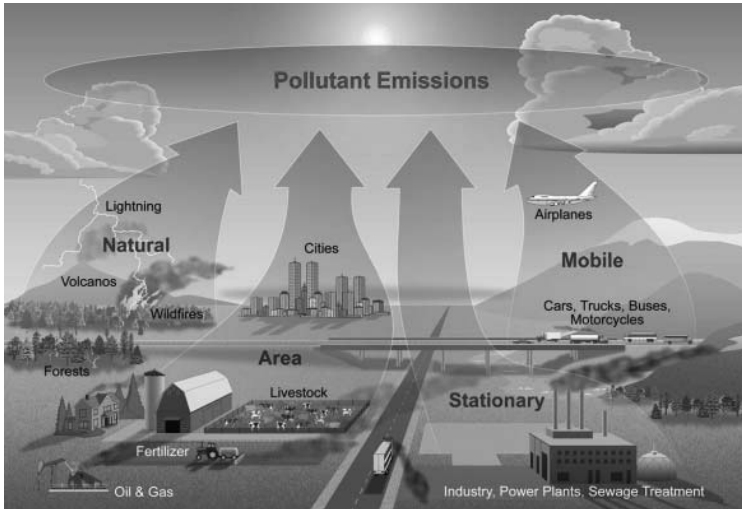
Polusi udara adalah pencemaran lingkungan di media udara yang berada dalam atau di luar ruangan oleh bahan kimia, fisik, atau biologis apa pun yang mengubah karakteristik alami atmosfer dimana level bahan tersebut melebihi dari nilai ambang batas yang ditetapkan. Polusi udara akan mempengaruhi kualitas media yang dilewatinya. Di Anhui, Cina, kualitas udara ambien ditemukan berasosiasi dengan kualitas permukaan tanah, ruang hijau dan kasus hipertensi (Li et al., 2022). Kontaminasi tanah dan polusi mikroplastik di permukiman perkotaan kecil di India juga menunjukkan tingkat keparahan akibat aktivitas manusia yang tidak

dikelola dan menyebabkan risiko kesehatan akibat pencemaran udara (Sarkar et al., 2022).

Semakin rendah indikator yang berkaitan dengan kualitas lingkungan, probabilitas munculnya risiko kesehatan yang akan dialami masyarakat semakin tinggi. Pencemaran di lingkungan udara menjadi salah satu ancaman yang tidak hanya mempengaruhi kualitas udara, tetapi juga secara tidak langsung kualitas air tanah, tanah, vegetasi, hutan, iklim dan kesehatan penduduk (Xie et al., 2017). Konsentrasi polutan di udara dapat berubah dari satu daerah ke daerah lain tergantung pada faktor-faktor meteorologi, seperti kecepatan, arah angin serta keadaan geografis. Udara yang bergerak dinamis ditambah siklus angin dan keadaan iklim membuat jangkauan sebaran polutan semakin luas dan terakumulasi pada media lain yang dilewatinya.

## 1.2 Sumber Utama Pencemaran Udara

Pencemaran udara disebabkan oleh beberapa faktor. Berdasarkan sumber pencemaran udara, terdapat 4 sumber utama pencemaran udara yaitu sumber diam (*stationary*), sumber yang bergerak (*mobile*), sumber lokasi/area (*area*) dan secara alami (*natural*) (National Park Service U.S Department of the Interior, 2018). Gambar 1 menunjukkan ilustrasi pencemaran udara dari berbagai sumber.



**Gambar 1.1** Beberapa Sumber Pencemaran Udara (NPS U.S Government, 2018).

### 1.2.1 Sumber diam/ tidak bergerak (*Stationary Source*)

Sumber polusi yang tidak bergerak sangat mudah diidentifikasi. Seperti namanya, sumber tersebut berasal dari satu tempat (OCDE, 2016). Sumber polusi diam/*nonpoint/stationary* lebih sulit untuk diidentifikasi dan lebih sulit untuk diatasi. Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA) mendefinisikan pencemaran sumber diam sebagai kontaminan apa pun yang masuk ke lingkungan dari tempat yang mudah diidentifikasi dan tertutup. Contohnya, cerobong asap dan pembakaran sampah padat melalui insenerasi.

Pabrik dan pembangkit listrik dapat menjadi sumber polusi sumber-titik, yang memengaruhi udara dan air. Asap industri dapat berupa karbon monoksida, logam berat, sulfur dioksida, nitrogen dioksida, atau partikulat ke udara (Yadegarnia et al., 2019). Sebagian besar sumber industri melepaskan polusi ke atmosfer melalui cerobong asap pada ketinggian yang cukup untuk memberikan pengenceran (*dilution*) yang cukup sebelum polutan mencapai permukaan tanah. Namun, kondisi meteorologi tertentu dapat mencegah

atau mengurangi keefektifan dispersi ini dan polutan dapat terperangkap di dekat sumber dan turun ke permukaan tanah sehingga dapat menyebabkan kualitas udara lokal yang buruk (Han et al., 2021; Raimi et al., 2019). Orang yang tinggal di dekat sumber titik dapat terpapar melalui sejumlah jalur tergantung pada sumber titik dan jenis pelepasannya. Inhalasi akan menjadi sumber paparan utama tetapi untuk beberapa kasus, jalur tidak langsung seperti makanan akan sangat berperan (Kibble & Harrison, 2005).

### 1.2.2 Sumber bergerak (*Mobile Source*)

Selain dari sumber titik, polusi udara dapat dilepaskan dari sumber non-titik seperti sumber bergerak (misalnya lalu lintas jalan raya atau emisi pesawat terbang) dan sumber area. Untuk banyak polutan udara umum, kendaraan bermotor merupakan sumber emisi terbesar di Inggris Raya, yang menyumbang sekitar 49% dari total emisi  $\text{NO}_2$ . Lalu lintas jalan merupakan sumber utama polutan udara di kota modern dan berpotensi membuat pejalan kaki dan penumpang kendaraan terpapar polutan lokal dengan konsentrasi tinggi (Wei et al., 2021). Di Hong Kong, ruas jalan yang paling tercemar (10% teratas) berada di pintu masuk terowongan dan titik kemacetan. Lalu lintas menghasilkan partikel udara melalui emisi gas buang dari pembakaran bahan bakar, serta resuspensi PM non-gas dari jalan raya, ban, dan keausan rem. *Non-exhaust* PM terutama dalam fraksi kasar (*coarse fraction*) antara 2,5 dan 10  $\mu\text{m}$  diameter dan merupakan sumber penting dari jejak logam di PM di lingkungan perkotaan. Partikel dari knalpot kendaraan merupakan sumber utama partikel ultrahalus, dengan diameter  $<0,1 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{0,1}$ ).

Partikel dari lalu lintas memiliki potensi oksidatif yang tinggi, kemungkinan karena logam yang timbul dari abrasi mesin dan rem. Beberapa penelitian, tetapi tidak semua, telah menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kepadatan lalu lintas, kapasitas PM pinggir jalan untuk menghasilkan spesies oksigen reaktif yang merusak jaringan meningkat. PM

dari lokasi dengan kepadatan lalu lintas tinggi telah terbukti lebih beracun bagi hewan daripada PM dari lokasi lain (Hime et al., 2018).

### 1.2.3 Sumber lokasi/ area (*Area Source*)

Sumber ini adalah sumber kecil polusi udara yang dengan sendirinya mungkin tidak memancarkan banyak emisi tetapi, ketika emisi mereka ditambahkan bersama-sama, merupakan bagian yang signifikan dari total emisi racun udara. USEPA menyebut kategori ini sebagai "area dan sumber lain", dan mencakup sumber industri kecil yang berada di bawah ambang batas "sumber utama". Sumber area seringkali terlalu kecil atau terlalu banyak untuk diinventarisasi secara individual.

Sumber area ini dipicu oleh letak geografis dan aktifitas di daerah tersebut. Misalnya di Chiang Mai, kota terbesar di Thailand utara, fitur geografisnya menciptakan kondisi tertentu (suhu, kecepatan angin rendah dan periode enam bulan dengan tingkat curah hujan rendah antara November dan April) yang memperburuk kabut selama musim kemarau, terutama selama Februari dan Maret (Chantara, 2012). Selama bulan-bulan ini, sumber utama polusi udara adalah pembakaran terbuka pada awal dan akhir siklus pertanian. Dalam sistem perladangan berpindah yang tipikal (kebanyakan di dataran tinggi), sebagian lahan berhutan yang telah dibiarkan kosong selama bertahun-tahun (lamanya tergantung pada jumlah lahan yang tersedia) ditebang, vegetasi dibiarkan kering kemudian api digunakan untuk menyiapkan lahan sebelum menanam padi atau tanaman komersial), api juga digunakan untuk membersihkan lahan dari sisa panen dan hama setelahnya. Di daerah perkotaan, PM dari pembakaran biomassa berinteraksi dengan PM dari sumber lain seperti gas buang pembakaran internasional (berasal dari negara tetangga) dan dari kendaraan.



### 1.2.4 Sumber alami (*Natural Source*)

Sumber alami dari pencemaran udara yaitu pelapukan batuan, erupsi gunung berapi, debu dari gurun serta berasal dari faktor antropogenik (*anthropogenic source*) seperti transportasi, aktifitas industri, pembakaran sampah, pengangkutan dan rumah tangga (Daud & Dullah, 2013). Sumber partikel alami — debu, garam laut, dan bahan organik dari tumbuhan — yang masih ada di atmosfer ketika emisi antropogenik dihilangkan dari udara. Di beberapa wilayah, kondisi geografis dan topografi berpengaruh kuat pada kualitas udara di daerah *urban* dan pemukiman. Misalnya di daerah dengan iklim yang kering dan berpasir, akan mengalami pencemaran udara lokal/regional yang sesuai dengan kondisi cuaca (Chham et al., 2017; Putri et al., 2021). Daerah tersebut akan mengalami badai pasir yang membawa sejumlah besar polutan udara yang mengganggu aktifitas penduduk. Peristiwa ini sering terjadi di daerah Arab Saudi, Qatar ataupun negara-negara gurun di Benua Afrika.

## 1.3 Jenis Partikulat di Udara Berdasarkan Ukuran

### 1.3.1 Partikulat PM<sub>10</sub>

Jenis partikulat ini memiliki ukuran kurang dari 10  $\mu\text{m}$ , atau disebut PM<sub>10</sub>. Partikulat ini sering disebut „partikel kasar“ (PM<sub>10</sub>, diameter 2,5–10  $\mu\text{m}$ ). Partikulat ini merupakan salah satu dari lima parameter kualitas udara, bersama dengan karbon monoksida, oksida nitrogen, oksida sulfur, dan permukaan ozon. Pada peristiwa kebakaran hutan, aerosol PM<sub>10</sub> bersama dengan permukaan ozon menimbulkan suatu fenomena yang disebut asap kabut (*smog*). Nilai Ambang Batas (NAB) pada PM<sub>10</sub> adalah 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  selama 24 jam. Ada juga standar PM<sub>10</sub> tahunan sebesar 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Sebuah studi yang dilakukan di 19 kota di Eropa memperkirakan bahwa pengurangan konsentrasi PM<sub>10</sub> hanya sebesar 5  $\mu\text{g}/\text{m}_3$  akan mencegah antara 3300 dan 7700 kematian per tahun. Penyerapan PM<sub>10</sub> di paru-paru mengaktifkan peradangan dengan dua cara berbeda. Yang pertama terdiri

dari generasi sitokin pro-inflamasi oleh *makrofag* yang telah memfagositosis  $PM_{10}$  yang kedua memerlukan induksi produksi kemokin oleh epitel paru (Fujii et al., 2001).

### 1.3.2 Partikulat $PM_{2.5}$

Partikel halus dengan diameter aerodinamis sama dengan atau kurang dari 2,5 mikrometer ( $PM_{2.5}$ ) merupakan komponen utama pencemar udara dan juga sering disebut sebagai *fine particulate*. Selain  $PM_{2.5}$ , Efek buruk dari  $PM_{2.5}$  pada kesehatan masyarakat telah diakui dengan baik. Banyak metode telah dikembangkan untuk pemetaan konsentrasi  $PM_{2.5}$  di permukaan tanah dengan memanfaatkan kemajuan *machine learning* dan teknologi observasi. Polusi udara partikel halus luar ruangan dalam hal ini adalah  $PM_{2.5}$  adalah ancaman kesehatan masyarakat global yang utama. WHO mencatat terjadinya 4,2 juta kematian dini kardiovaskular, pernapasan, dan kanker di seluruh dunia per tahun akibat  $PM_{2.5}$  (Bari & Kindzierski, 2016; Díaz & Rosa Dominguez, 2009).

Peningkatan suhu dapat meningkatkan reaksi fotokimia sekunder yang meningkatkan konsentrasi  $PM_{2.5}$ . Namun, suhu yang lebih rendah berkorelasi dengan peningkatan pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa serta kondisi atmosfer yang stagnan, sehingga juga meningkatkan konsentrasi  $PM_{2.5}$  (Toro A. et al., 2014). Kelembaban juga tidak memiliki korelasi yang konsisten dengan  $PM_{2.5}$ . Beberapa komponen  $PM_{2.5}$  seperti nitrat dan sulfat, konsentrasinya meningkat dengan kelembaban relatif, sementara konsentrasi komponen lain, seperti karbon organik dan unsur, menurun dengan tingkat kelembaban yang lebih tinggi yang dapat menyebabkan presipitasi dan menurunkan tingkat  $PM_{2.5}$  secara keseluruhan (Z. Wang et al., 2018).

$PM_{2.5}$  adalah polutan utama masalah kesehatan di Republik Korea, terutama di kota-kota seperti Seoul. Meskipun tren penurunan konsentrasi  $PM_{2.5}$  telah diamati, konsentrasinya tetap di atas standar nasional ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  untuk data tahunan dan  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  setiap hari) (Kumar et al., 2022). Polusi

PM<sub>2.5</sub> sebagian besar dihasilkan oleh lalu lintas dan pembakaran bahan bakar rumah tangga dan memiliki dampak kesehatan negatif yang signifikan. Selain itu, populasi perkotaan yang terus berkembang menghabiskan sebagian besar waktunya di lingkungan dalam ruangan di mana mereka terpapar PM<sub>2.5</sub> yang dibawa dari lingkungan luar melalui aliran udara ventilasi.

Dengan diameter yang lebih kecil, partikel dalam kisaran PM<sub>2.5</sub> dapat merusak sel saluran napas, memicu respons peradangan yang mengurangi kekebalan paru dan memfasilitasi serangan patogen menular. Penetrasi yang lebih dalam ke paru-paru memungkinkan PM<sub>2.5</sub> memasuki aliran darah, menyebabkan hipertensi dan merusak pembuluh darah. Begitu berada di aliran darah, PM<sub>2.5</sub> dapat menyebar ke organ lain, seperti jantung, merusak struktur dan fungsi selnya (Feng et al., 2016; Jan et al., 2017). Meskipun PM<sub>2.5</sub> perkotaan sebagian besar berasal dari lokal dan antropogenik, topografi dan iklim lokal mempengaruhi tingkat PM<sub>2.5</sub>, yaitu dengan memfasilitasi atau menghalangi penyebaran partikel. Pegunungan lokal membatasi penyebaran PM<sub>2.5</sub>, seperti yang ditunjukkan oleh penurunan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dengan ketinggian. Lokasi yang dikelilingi oleh pegunungan dan badan air mengalami pergantian angin laut dan aliran gunung yang mencegah partikel terbawa, efek yang terlihat di tempat-tempat seperti Los Angeles, Seoul (Republik Korea) dan Santa Cruz de Tenerife (Spanyol).

### 1.3.3 Partikulat PM<sub>1</sub>

Jenis partikulat PM<sub>1</sub> mengacu pada partikel dengan diameter aerodinamis kurang dari atau sama dengan 1 µm di udara sekitar. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian tentang PM<sub>1</sub> semakin meningkat. Konsentrasi massa PM<sub>1</sub> lebih tinggi di daerah perkotaan dibandingkan daerah terpencil, sebagaimana dicatat dari 30 stasiun pengamatan di seluruh dunia (Zhang et al., 2007). PM<sub>1</sub> diyakini secara luas memberikan informasi yang lebih baik tentang fraksi antropogenik polusi partikel daripada

PM<sub>2.5</sub>. Namun, data tentang PM<sub>1</sub> masih terbatas di Eropa serta informasi komprehensif tentang komposisi kimia dan pembagian sumbernya. Di Panzhuhua, Cina, kegiatan pertambangan telah menyebabkan masalah polusi udara dari PM<sub>1</sub> yang parah dan memberikan kontribusi yang besar terhadap pembangunan ekonomi.

Komposisi kimia PM<sub>1-2.5</sub> adalah meliputi nitrat, sulfat, karbon organik, dan logam. Menurut penelitian sebelumnya, terdapat 41% hari kabut asap di Shanghai dari tahun 2008 hingga 2010 (Zhou et al., 2014). Pada hari cerah, amonium paling melimpah di PM<sub>1-2.5</sub> sedangkan sulfat adalah ion paling melimpah di PM<sub>1</sub> di antara sulfat, nitrat, dan amonium. PM<sub>1-2.5</sub> menunjukkan hubungan positif yang signifikan dengan kejadian asma di antara orang dewasa paruh baya dan lanjut usia, yang dapat dikaitkan dengan distribusi ukuran partikel polutan dalam tubuh manusia dan komposisi kimianya. Manojkumar dan rekan melaporkan bahwa fraksi pengendapan PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>1</sub> sama di daerah *tracheobronkial* tetapi berbeda di daerah kepala dan paru, menunjukkan bahwa pengendapan PM<sub>1-2.5</sub> mungkin berbeda dengan PM<sub>1</sub> yang cenderung berada di daerah kepala dan paru (Manojkumar et al., 2019).

#### 1.4 Risiko Kesehatan dan Penyakit Akibat Pencemaran Udara

Polusi udara sekarang menyebabkan kematian dini satu dari sembilan orang secara global termasuk sekitar empat hingga tujuh juta orang di negara berkembang, yang sebagian besar terjadi di Asia. Menurut penilaian WHO, 9 dari 10 orang di seluruh dunia menghirup udara yang mengandung polutan tingkat tinggi, yang mengakibatkan sekitar 7 juta kematian setiap tahun akibat paparan udara yang tercemar, di mana 660.000 di antaranya adalah anak-anak. Polusi udara sekitar saja menyebabkan sekitar 4,2 juta kematian pada tahun 2016, sementara polusi udara dalam ruangan dari pembakaran bahan bakar biomassa (BMF) telah menyebabkan sekitar 3,8 juta kematian pada periode yang sama. Dampak global dari polusi udara dan PM<sub>2.5</sub> pada kesehatan otak dan demensia, pencegahan melalui peningkatan kualitas

udara dapat memberikan hasil kesehatan yang lebih baik, meningkatkan produktivitas dan kualitas hidup, dan mengurangi biaya terkait kesehatan.

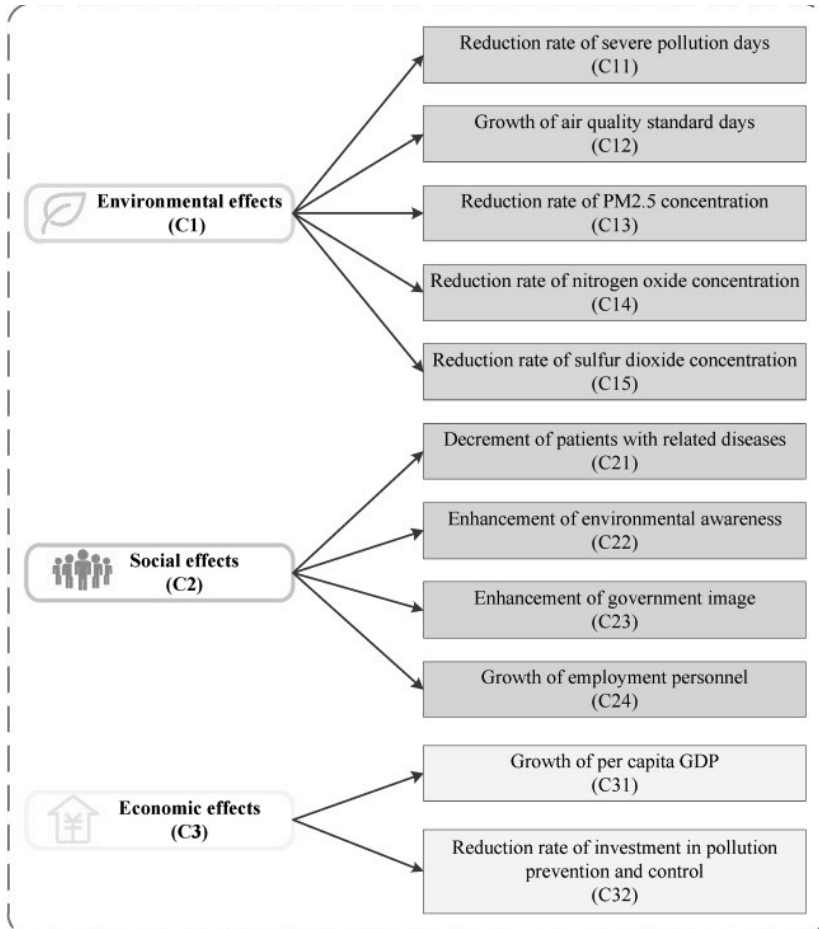
Kebanyakan orang menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan (>90%), yang dapat mencakup berbagai pengaturan yang sangat luas termasuk rumah, rumah sakit, tempat kerja, sekolah, transportasi umum, dan mobil. Polutan udara dalam ruangan dapat berasal dari sumber dalam dan luar ruangan. Polutan udara dalam ruangan termasuk polutan gas (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, radon), partikulat, zat volatil (VOC, formaldehida), dan agen biologis (alergen, endotoksin, jamur, bakteri). Sumber polutan di dalam ruangan antara lain pembakaran (pemanas, pembakar kayu, pengasapan, memasak), furnitur dan bahan bangunan, hobi, kegiatan bersih-bersih, serta dari jamur, bakteri, hewan peliharaan, dan tumbuhan. Infiltrasi polusi lalu lintas luar ruangan bisa sangat tinggi di rumah-rumah di kota dan di dekat jalan yang sibuk. Faktor-faktor seperti desain dan material bangunan serta ventilasi alami dan mekanis akan mempengaruhi tingkat polutan udara dalam ruangan dari sumber dalam dan luar ruangan. Selain itu, paparan polusi udara di dalam mobil, terutama untuk anak-anak di kursi belakang, bisa lebih buruk daripada di luar kendaraan, meskipun masalah variasi rute dan moda perjalanan membutuhkan berbagai faktor yang harus dipertimbangkan.

Beberapa penelitian mutakhir telah menunjukkan bahwa polusi udara meningkatkan risiko internalisasi psikopatologi, termasuk gangguan kecemasan dan depresi. Selain itu, hubungan antara polusi udara dan kesehatan mental yang buruk mungkin berhubungan dengan perubahan struktur saraf dan fungsi saraf. Polutan udara yang berbeda dan khususnya PM dan oksida nitrat telah dikaitkan dengan kesehatan mental yang buruk; eksposisi panjang ke PM<sub>2.5</sub> telah dikaitkan dengan peningkatan risiko timbulnya gejala depresi baru (ukuran efek Cohen d: 0,05–0,81), sementara peningkatan konsentrasi nitrat dioksida di musim panas dengan memburuknya kondisi depresi yang ada (ukuran efek Cohen d: 0,05–1,77). Namun, interpretasi temuan ini harus mempertimbangkan desain *retrospektif*

pada penelitian, periode pengamatan yang berbeda, faktor perancu seperti usia lanjut atau komorbiditas medis.

Efek kesehatan polusi udara hampir pasti mempengaruhi kondisi pernapasan manusia. Sebagian besar alveoli berkembang setelah lahir dan fungsi paru-paru terus berkembang selama masa remaja, anak-anak lebih rentan terhadap dampak buruk polusi udara daripada orang dewasa. Anak-anak juga memiliki risiko paparan polusi udara yang lebih tinggi daripada orang dewasa, karena mereka memiliki menit ventilasi yang relatif lebih tinggi, aktivitas fisik, dan menghabiskan lebih banyak waktu di luar ruangan. Efek pernapasan ini selama awal kehidupan dari polusi udara dapat bertahan hingga dewasa dan meningkatkan risiko penyakit pernapasan orang dewasa. Anak-anak yang lebih muda atau anak-anak dengan dismotilitas biasanya menghabiskan lebih banyak waktu di dalam ruangan. Sebaliknya, anak sehat menjelang usia sekolah biasanya lebih banyak berada di lingkungan luar. Oleh karena itu, pengaruh polusi udara dalam ruangan atau ambien dapat bervariasi pada anak-anak dengan usia dan motilitas yang berbeda.

Berdasarkan konsep pengendalian pencemaran udara, banyak peneliti mengemukakan pandangan mereka tentang pencegahan dan pengendalian pencemaran. Yang dan Wang (2017) mengusulkan model penilaian dan prediksi konsentrasi polutan, yang dapat memandu pekerjaan dan kehidupan manusia. Pembangunan sistem peringatan dini kualitas udara dari kontrol sebelumnya, yang berguna untuk membuat analisis komprehensif tentang polusi udara. Zong dkk. (2018) berkonsentrasi pada pengendalian polusi partikulat dan mengusulkan mode manajemen jaringan, yang membagi area polusi ke dalam jaringan yang berbeda sesuai dengan tingkat polusi dan mengambil tindakan tata kelola yang sesuai. Dari analisis di atas, dapat ditentukan suatu sistem indeks evaluasi untuk menggambarkan dampak pengendalian pencemaran udara dengan 11 subkriteria dari dampak lingkungan, dampak sosial dan dampak ekonomi (Purushothaman et al., 2021), seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2.



**Gambar 1.2** Efek dan langkah pengendalian kualitas udara (Purushothaman et al., 2021).

## 1.5 Kesimpulan

Pencemaran udara adalah bentuk kerusakan lingkungan dan didefinisikan sebagai keadaan udara alami yang tidak diinginkan, terkontaminasi dengan bahan berbahaya yang terbentuk sebagai akibat dari aktivitas manusia. Kontaminan dihasilkan dari emisi yang dihasilkan oleh proses manufaktur, terkait dengan produksi berbagai komoditas dan

barang Pengendalian polusi udara adalah hal yang paling penting untuk mewujudkan pembuatan kebijakan tindak lanjut dan kesempurnaan manajemen lingkungan. Pada bab ini, telah dijelaskan tentang sumber dan efek dari pencemaran udara secara komprehensif untuk evaluasi efek dari pencemaran udara bagi makhluk hidup. Studi dengan metodologi yang ketat diperlukan untuk mengkonfirmasi data kualitas udara regional dan global untuk saat ini.

## Daftar Pustaka

- ACGIH. (2004). Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. In *ACGIH Worldwide, Signature Publications*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Ahn, J., Kim, N. S., Lee, B. K., Oh, I., & Kim, Y. (2019). Changes of atmospheric and blood concentrations of lead and cadmium in the general population of South Korea from 2008 to 2017. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122096>
- ATSDR. (1999). Toxicological Profile for Mercury. In *U.S. Department of Health and Human Services* (Issue March).
- ATSDR. (2012a). ToxGuide for Cadmium. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, 2.
- ATSDR. (2012b). Toxicological Profile for Cadmium. *U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES*. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp5.pdf>
- Bahiru, D. B. (2017). Level of Some Toxic Heavy Metal in Selected Vegetables, Soil and Wastewater around Eastern Industry Zone, Central Ethiopia. In *Haramaya University*. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.ampbs.2017.04.001%0Ahttp://dx.doi>



org/10.1016/j.arabjc.2013.08.010%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075%0Ahttp://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0308555101%0Ahttp://www.treemediation.com/technical/phytoremed

- Bari, Md. A., & Kindzierski, W. B. (2016). Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in Edmonton, Canada: Source apportionment and potential risk for human health. *Environmental Pollution*, 218, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.014>
- Bharatraj, K., & Yathapu, R. (2018). Nutrition-pollution interaction: An emerging research area. *Indian Journal Medical Research*. [https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR\\_1733\\_18](https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_1733_18) Nutrition-pollution
- Bhat, J. A., Shivaraj, S. M., Singh, P., Navadagi, D. B., Tripathi, D. K., Dash, P. K., Solanke, A. U., Sonah, H., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants8030071>
- Chen, Y., Fung, J. C. H., Chen, D., Shen, J., & Lu, X. (2019). Source and exposure apportionments of ambient PM<sub>2.5</sub> under different synoptic patterns in the Pearl River Delta region. *Chemosphere*, 236, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.236>
- Chham, E., Piñero-García, F., González-Rodelas, P., & Ferro-García, M. A. (2017). Impact of air masses on the distribution of <sup>210</sup>Pb in the southeast of Iberian Peninsula air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 177, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.030>
- Chou, T. C., Wang, P. C., Wu, J. de, & Sheu, S. C. (2016). Chromium-induced skin damage among Taiwanese cement workers. *Toxicology and Industrial Health*, 32(10), 1745–1751. <https://doi.org/10.1177/0748233715584699>

- Darmono. (1995). *Logam dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*. Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
- Darmono. (2010). *Lingkungan Hidup dan Pencemaran, Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam*. Penerbit Universitas Indonesia.
- Daud, A., & Dullah, A. A. (2013). *Perspektif Analisis Risiko Lingkungan dan Kesehatan*. Smart Writing.
- Díaz, R. V., & Rosa Dominguez, E. (2009). Health risk by inhalation of PM2.5 in the metropolitan zone of the City of Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(3), 866–871. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.09.014>
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., & Wang, X. (2016). The health effects of ambient PM2.5 and potential mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.030>
- Fujii, T., Hayashi, S., Hogg, J. C., Vincent, R., & van Eeden, S. F. (2001). Particulate Matter Induces Cytokine Expression in Human Bronchial Epithelial Cells. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 25(3), 265–271. <https://doi.org/10.1165/ajrcmb.25.3.4445>
- Gan, Y., Huang, X., Li, S., Liu, N., Li, Y. C., Freidenreich, A., Wang, W., Wang, R., & Dai, J. (2019). Source quantification and potential risk of mercury, cadmium, arsenic, lead, and chromium in farmland soils of Yellow River Delta. *Journal of Cleaner Production*, 221, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.157>
- Haase, H., & Rink, L. (2009). Functional Significance of Zinc-Related Signaling Pathways in Immune Cells. *Annual Review of Nutrition*, 29(1), 133–152. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-080508-141119>

- Han, Q., Liu, Y., Feng, X., Mao, P., Sun, A., Wang, M., & Wang, M. (2021). Pollution effect assessment of industrial activities on potentially toxic metal distribution in windowsill dust and surface soil in central China. *Science of The Total Environment*, 759, 144023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144023>
- Hime, N., Marks, G., & Cowie, C. (2018). A Comparison of the Health Effects of Ambient Particulate Matter Air Pollution from Five Emission Sources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1206. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061206>
- Jan, R., Roy, R., Yadav, S., & Satsangi, P. G. (2017). Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. *Building and Environment*, 111, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>
- Jeffery, G. H., Bassett, J., Mendham, J., & Denney, R. C. (1990). *Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis 5th Edition* (Vol. 14, Issue 2, p. 100). Longman Scientific & Technical. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(90\)90087-8](https://doi.org/10.1016/0160-9327(90)90087-8)
- Kibble, A., & Harrison, R. (2005). Point sources of air pollution. *Occupational Medicine*, 55(6), 425–431. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi138>
- Knoell, D. L., Smith, D. A., Sapkota, M., Heires, A. J., Hanson, C. K., Smith, L. M., Poole, J. A., Wyatt, T. A., & Romberger, D. J. (2019). Insufficient zinc intake enhances lung inflammation in response to agricultural organic dust exposure. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 70, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.04.007>
- Kridin, K., Bergman, R., Khamaisi, M., Zelber-Sagi, S., & Weltfriend, S. (2016). Cement-Induced Chromate Occupational Allergic Contact Dermatitis. *Dermatitis*, 27(4), 208–214. <https://doi.org/10.1097/DER.0000000000000203>

- Kumar, N., Johnson, J., Yarwood, G., Woo, J.-H., Kim, Y., Park, R. J., Jeong, J. I., Kang, S., Chun, S., & Knipping, E. (2022). Contributions of domestic sources to PM<sub>2.5</sub> in South Korea. *Atmospheric Environment*, 287, 119273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119273>
- Li, G., Zhang, H., Hu, M., He, J., Yang, W., Zhao, H., Zhu, Z., Zhu, J., & Huang, F. (2022). Associations of combined exposures to ambient temperature, air pollution, and green space with hypertension in rural areas of Anhui Province, China: A cross-sectional study. *Environmental Research*, 204, 112370. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112370>
- Mallongi, A., Astuti, R. D. P., Amiruddin, R., Hatta, M., & Rauf, A. U. (2022). Identification source and human health risk assessment of potentially toxic metal in soil samples around karst watershed of Pangkajene, Indonesia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100634. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100634>
- Mani, M. S., Kabekkodu, S. P., Joshi, M. B., & Dsouza, H. S. (2019). Ecogenetics of lead toxicity and its influence on risk assessment. *Human and Experimental Toxicology*. <https://doi.org/10.1177/0960327119851253>
- Manojkumar, N., Srimuruganandam, B., & Shiva Nagendra, S. M. (2019). Application of multiple-path particle dosimetry model for quantifying age specified deposition of particulate matter in human airway. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.091>
- Maret, W., & Moulis, J.-M. (2013). The Bioinorganic Chemistry of Cadmium in the Context of Its Toxicity. In A. Sigel & H. Sigel (Eds.), *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8>

- National Park Service U.S Department of the Interior. (2018). *Where Does Air Pollution Come From?* <https://www.nps.gov/subjects/air/sources.htm>
- Nordberg, G., Fowler, B., & Nordberg, M. (2015). *Handbook on the Toxicology of Metals Fourth Edition: Vol. I* (B. A. Fowler, G. F. Nordberg, & M. Nordberg, Eds.; IV). Elsevier.
- Núñez, O., Fernández-Navarro, P., Martín-Méndez, I., Bel-Lan, A., Locutura, J. F., & López-Abente, G. (2016). Arsenic and chromium topsoil levels and cancer mortality in Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17664–17675. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6806-y>
- OCDE. (2016). *The economic consequences of outdoor air pollution. Policy highlights*. 116. <https://doi.org/10.1787/9789264257474-en>
- Palar, H. (2012). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Penerbit Rineka Cipta.
- Peirce, J., Weiner, R. F., & Vesilind, P. A. (1997). *Environmental Pollution Control* (Vol. 4).
- Purushothaman, S. K., Selvam, J., & Muthunarayanan, V. (2021). Ambient indoor air pollution and its consecutive effect on environment materials and health. *Materials Today: Proceedings*, 37, 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.483>
- Putri, R. M., Amin, M., Suciari, T. F., al Fattah Faisal, M., Auliani, R., Ikemori, F., Wada, M., Hata, M., Tekasakul, P., & Furuuchi, M. (2021). Site-specific variation in mass concentration and chemical components in ambient nanoparticles (PM0.1) in North Sumatra Province-Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101062. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101062>

- Rai, A., Maurya, S. K., Khare, P., Srivastava, A., & Bandyopadhyay, S. (2010). Characterization of Developmental Neurotoxicity of As, Cd, and Pb Mixture: Synergistic Action of Metal Mixture in Glial and Neuronal Functions. *Toxicological Sciences*, 118(2), 586–601. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq266>
- Raimi, I., Komolafe, B., Agboola, O., Mugivhisa, L., & Olowoyo, J. (2019). Influence of Wind Direction on the Level of Trace Metals in Plants Collected around a Quarry Site in South Africa. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(5), 3385–3393. <https://doi.org/10.15244/pjoes/94846>
- Rauf, A. U., Mallongi, A., & Astuti, R. D. P. (2020). Heavy Metal Contributions on Human Skin Disease near Cement Plant: A Systematic Review. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 8(F), 117–122. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2020.4396>
- Sarkar, A., Deb, S., Ghosh, S., Mandal, S., Quazi, S. A., Kushwaha, A., Hoque, A., & Choudhury, A. (2022). Impact of anthropogenic pollution on soil properties in and around a town in Eastern India. *Geoderma Regional*, 28, e00462. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00462>
- Scoullou, M. J., Vonkeman, G. H., Thornton, I., & Makuch, Z. (2001). *Handbook for Sustainable Heavy Metals Policy and Regulation* (Volume 31). Springer-Science+Business Media, BV. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0403-9> Cover
- Shimbo, S., Zhang, Z. W., Watanabe, T., Nakatsuka, H., Matsuda-Inoguchi, N., Higashikawa, K., & Ikeda, M. (2001). Cadmium and lead contents in rice and other cereal products in Japan in 1998-2000. *Science of the Total Environment*, 281(1–3), 165–175. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00844-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00844-0)

- Skerfving. (1991). *Skerfving S (1991). Exposure to mercury in the population.* Plenum Press.
- Sudarmaji, Sutomo, A. H., & Suwarni, A. (2004). Konsumsi Ikan Laut, Kadar Mercury Dalam Rambut, Dan Kesehatan Nelayan Di Pantai Kenjeran Surabaya. *Manusia Dan Lingkungan*, 11(1), 134–142.
- Svehla, G. (1997). *Textbook of Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis* (Vol. 343, Issue 3). Longman Group Limited. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(97\)89603-1](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(97)89603-1)
- Thirulogachandar, A., Rajeswari, M., & Ramya, S. (2014). Assessment of Heavy Metals in Gallus and their Impacts on Human. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(6), 1–8. [www.ijsrp.org](http://www.ijsrp.org)
- Tong, R., Cheng, M., Yang, X., Yang, Y., & Shi, M. (2019). Exposure levels and health damage assessment of dust in a coal mine of Shanxi Province, China. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.022>
- Toro A., R., Morales S., R. G. E., Canales, M., Gonzalez-Rojas, C., & Leiva G., M. A. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment*, 79, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.004>
- Vinceti, M., Bassissi, S., Malagoli, C., Pellacani, G., Alber, D., Bergomi, M., & Seidenari, S. (2005). Environmental exposure to trace elements and risk of cutaneous melanoma. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(5), 458–462. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500423>
- Wai, K. M., Mar, O., Kosaka, S., Umemura, M., & Watanabe, C. (2017). Prenatal heavy metal exposure and adverse birth outcomes in Myanmar: A

- birth-cohort study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph14111339>
- Wang, J., Gao, Z. Y., Yan, J., Ying, X. L., Tong, S. L., & Yan, C. H. (2017). Sex differences in the effects of prenatal lead exposure on birth outcomes. *Environmental Pollution*, 225, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.031>
- Wang, Z., Zhong, S., He, H., Peng, Z.-R., & Cai, M. (2018). Fine-scale variations in PM<sub>2.5</sub> and black carbon concentrations and corresponding influential factors at an urban road intersection. *Building and Environment*, 141, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.042>
- Wani, A. L., Ara, A., & Usmani, J. A. (2015). Lead toxicity: A review. *Interdisciplinary Toxicology*, 8(2), 55–64. <https://doi.org/10.1515/intox-2015-0009>
- Waseem, A., & Arshad, J. (2016). A review of Human Biomonitoring studies of trace elements in Pakistan. In *Chemosphere* (Vol. 163, pp. 153–176). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.011>
- Wei, P., Brimblecombe, P., Yang, F., Anand, A., Xing, Y., Sun, L., Sun, Y., Chu, M., & Ning, Z. (2021). Determination of local traffic emission and non-local background source contribution to on-road air pollution using fixed-route mobile air sensor network. *Environmental Pollution*, 290, 118055. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118055>
- WHO. (2000). *Guidelines for Air Quality*. WHO.
- WHO. (2019). *World Health Statistics 2019*.
- Xiang, L., Liu, P., Jiang, X., & Chen, P. (2019). Health risk assessment and spatial distribution characteristics of heavy metal pollution in rice samples from a surrounding hydrometallurgy plant area in No.



- 721 uranium mining, East China. *Journal of Geochemical Exploration*, 207(April), 106360. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106360>
- Xie, W., Peng, C., Wang, H., & Chen, W. (2017). Health risk assessment of trace metals in various environmental media, crops and human hair from a mining affected area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121595>
- Yadegarnia, F., Id, N., Azimzadeh, H., Arani, A. M., Id, A. S., & Id, B. K. (2019). Ecological risk assessment of heavy metals from cement factory dust. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 6(2), 129–137. <https://doi.org/10.15171/EHEM.2019.15>
- Zhang, Q., Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Allan, J. D., Coe, H., Ulbrich, I., Alfarra, M. R., Takami, A., Middlebrook, A. M., Sun, Y. L., Dzepina, K., Dunlea, E., Docherty, K., DeCarlo, P. F., Salcedo, D., Onasch, T., Jayne, J. T., Miyoshi, T., Shimojo, A., ... Worsnop, D. R. (2007). Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes. *Geophysical Research Letters*, 34(13), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007GL029979>

# BAB 2

## PARTIKULAT LOGAM

### 2.1 Definisi Logam

Logam adalah elemen yang hadir sebagai ion positif atau dalam bentuk kation (+ion) dalam larutan. Istilah „logam berat“ biasa digunakan untuk menggambarkan logam atau metaloid yang dapat menimbulkan toksisitas oleh *Scientific Committee on Toxicology of Metals* (SCTM) di bawah *International Commission on Occupational Health* (ICOH) pada tahun 1970-an (Jeffery, Bassett, Mendham, & Denney, 1990). Logam ini tidak memiliki fungsi biologi sama sekali (Darmono, 1995). Logam berat yang paling lekat dengan aktifitas industri adalah arsen (As), merkuri (Hg), kadmium (Cd) dan timbal (Pb). Toksisitas biologis dari logam berat tidak hanya terkait dengan jumlah totalnya, tetapi juga dengan kandungan keadaan yang tersedia dan distribusi berbagai bentuk.

Logam ditemukan secara alami di lingkungan pada berbagai konsentrasi, dan beberapa merupakan nutrisi penting bagi manusia. Aktivitas manusia mengubah bentuk kimiawi logam, sehingga memengaruhi distribusi geologis dan biologis alaminya yang menyebabkan polusi beracun dan bioakumulasi logam tertentu melalui rantai makanan. Diketahui bahwa logam transisi, seperti Ni, V, Fe, Cu, mampu berpartisipasi dalam reaksi redoks yang menghasilkan stres oksidatif, dan karenanya dapat memiliki potensi lebih besar untuk menghasilkan efek kesehatan daripada konstituen

PM (*particulate matter*) lainnya. Ada juga bukti bahwa logam beracun lainnya dalam PM udara ambien, seperti Pb dan Zn, dapat mempengaruhi kesehatan manusia.

Di antara logam di atmosfer, Cd, Pb, dan Hg adalah logam yang paling umum yang juga berpotensi menimbulkan masalah kesehatan tambahan yang parah, karena persistensi dan bioakumulasinya dalam rantai makanan (WHO, 2007). WHO (2007) melaporkan sumber, sifat kimia, dan distribusi spasial Cd, Pb, dan Hg yang disebabkan oleh polusi udara lintas batas jarak jauh, dan mengevaluasi potensi risiko kesehatan di Eropa. Berdasarkan kajian konsentrasi logam berat di atmosfer berbagai belahan dunia sejak tahun 2006 oleh Suvarapu dan Baek (2017), konsentrasi logam berat lebih tinggi di Asia dibandingkan di negara-negara Eropa dan Amerika Utara. Fe dan Al dalam partikulat udara terutama berasal dari tanah, sedangkan aktivitas antropogenik merupakan sumber dominan Zn dan Pb ke atmosfer.

## 2.2 Jenis- Jenis Logam Berbahaya

### 2.2.1 Kadmium (Cd)

Logam kadmium (Cd) memiliki atom relatif 112,40 dan berwarna putih-silver. Logam ini akan meleleh di suhu 321°C. Senyawa kadmium akan larut dalam suasana asam. Dalam bentuk senyawa, kadmium klorida, kadmium nitrat dan kadmium sulfat larut dalam air, hanya kadmium sulfida yang tidak larut dan cenderung berwarna kuning (Jeffery et al., 1990). Kadmium terdistribusi secara luas sebagai deposit mineral dan ditemukan dalam serpih dan batuan beku (vulkanik), batu bara, batu pasir, batu kapur, sedimen danau dan laut, tanah, dan sebagainya. Beberapa mineral kadmium langka diketahui bernama Greenockite (CdS) dan Hawlegite, Cadmoseite (CdSe), Montepionite (CdO) dan Otavite (CdCO<sub>3</sub>) (Scoullis et al., 2001). Sumber antropogenik bergerak adalah sumber emisi yang berasal dari kendaraan bermotor, jalan raya, jalur kereta api dan sumber bergerak lain yang menghasilkan emisi. Model sebaran polutan dipengaruhi arah

horizontal searah angin (*crosswind*) maupun searah angin (*downwind*). Emisi dari industri berkontribusi hampir 66,3% terhadap pencemaran Cd di Yellow River Delta, Cina (Gan et al., 2019). Pertanian, emisi industri, dan sedimen yang tersuspensi sungai adalah tiga sumber utama untuk risiko pencemaran potensial yaitu, As, Cd, dan Cr.

Di atmosfer, kadmium terjadi menempel pada partikel, terutama yang dalam kategori submikron (sekitar 0,5–1  $\mu\text{m}$ ). Molnar dkk. (1995) juga mengidentifikasi ukuran partikel maksimum kedua yang lebih kecil sekitar 0,1  $\mu\text{m}$ . Spesies kadmium utama pada emisi adalah oksida, klorida, sulfida dan bentuk unsur. Oksida (CdO) dipancarkan oleh sebagian besar sumber antropogenik. Unsur kadmium dilepaskan selama proses suhu tinggi seperti pembakaran bahan bakar fosil organik dan pembakaran sampah. Sulfida (CdS) adalah senyawa mayoritas dalam emisi dari produksi logam non-ferrous dan pembakaran batu bara. Pembakaran sampah merupakan sumber kadmium klorida. Di daerah perkotaan, konsentrasi kadmium berkisar antara 1–10  $\text{ng}/\text{m}^3$ ; misalnya di Minsk, Belarusia, rata-rata konsentrasi tahunan kadmium atmosfer pada tahun 2004 adalah 3  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Di daerah industri, kadarnya berkisar antara 1–20  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Levelnya bahkan lebih tinggi (100  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) di dekat sumber industri kadmium. Misalnya dekat dengan pabrik non-besi di Belgia utara (Beerse), rata-rata konsentrasi tahunan 27  $\text{ng}/\text{m}^3$  (dengan puncak harian 370  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) telah dilaporkan. Pedoman kualitas udara WHO untuk kadmium sebesar 5  $\text{ng}/\text{m}^3$  telah direkomendasikan untuk mencegah peningkatan kadar kadmium lebih lanjut di tanah pertanian (WHO, 2000).

Merokok juga merupakan sumber paparan kadmium, yang mungkin melebihi dari makanan. Satu batang rokok mengandung sekitar 1–2  $\mu\text{g}$  kadmium. Rata-rata sekitar 10% dari ini dihirup selama merokok. Dengan demikian dapat diperkirakan bahwa seseorang yang merokok 20 batang per hari akan menyerap sekitar 1  $\mu\text{g}$  kadmium. Median konsentrasi kadmium darah (B-Cd) di Slovenia adalah 0,5  $\mu\text{g}/\text{l}$  pada bukan perokok, 1,0  $\mu\text{g}/\text{l}$  pada perokok ringan hingga sedang (kurang dari 20 batang/hari) dan 1,5  $\mu\text{g}/\text{l}$  pada perokok berat (lebih dari 20 batang/hari).

Kadmium masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi bahan partikulat atau melalui konsumsi dari makanan dan air. Proses biokimiawi dari bentuk kimia kadmium dapat menembus hambatan usus dan paru-paru (Maret & Moulis, 2013). Cd didistribusikan di paru-paru, ginjal, hati dan limpa setelah pajanan inhalasi. Tingginya kadar Cd dalam jaringan paru-paru sebagian besar disebabkan oleh rute pajanan melalui inhalasi (Chen et al., 2019) Hati dan ginjal adalah dua organ detoksifikasi utama untuk logam berat dan akumulasi preferensi Cd dalam dua organ ini juga dapat menunjukkan respons adaptif organisme untuk menghilangkan Cd dalam tubuh. Bukti epidemiologis menunjukkan bahwa Cd pada manusia dapat menyebabkan untuk tumor testis, toksisitas ginjal, paru-paru dan mungkin osteoporosis. Variasi antar individu yang mencolok telah ditemukan di antara orang-orang dari daerah yang sama serta kelompok usia yang sama dan diduga terpapar dengan jumlah Cd yang sama.

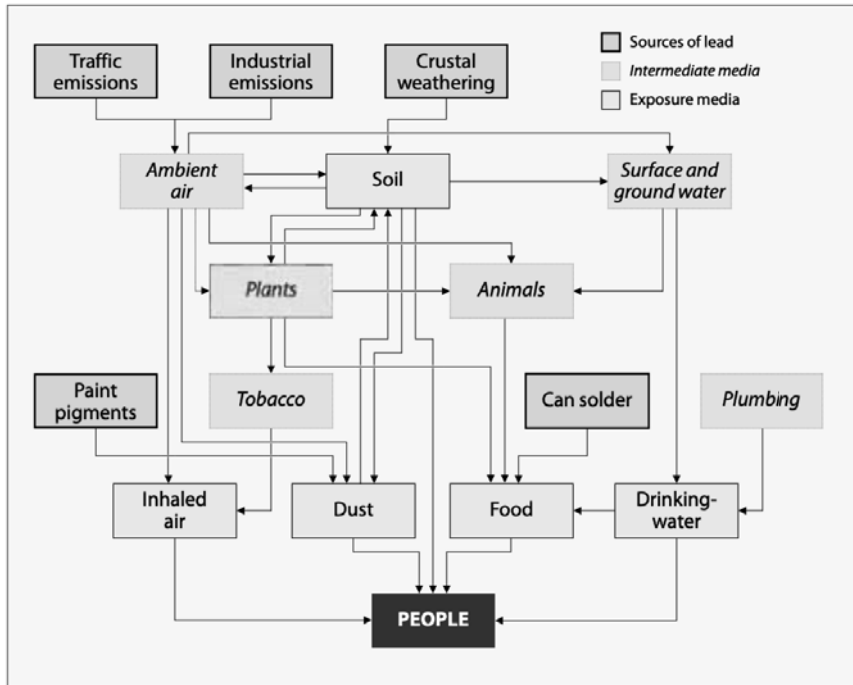
Penyerapan kadmium yang dihirup di paru-paru berkisar antara 10% sampai 50%. Penyerapan gastrointestinal normal rata-rata kadmium yang tertelan pada manusia berkisar antara 3% sampai 7%. Kadmium dalam jaringan terutama terikat pada metallothionein. Sintesis protein ini mungkin mewakili mekanisme pertahanan tubuh terhadap ion kadmium beracun. Jaringan hati dan ginjal adalah dua situs utama penyimpanan kadmium. Bayi yang baru lahir hampir bebas dari kadmium tetapi, sepanjang hidupnya, organ-organ ini mengakumulasi kadmium dalam jumlah yang cukup banyak (sekitar 40-80% dari beban tubuh). Pada paparan lingkungan tingkat rendah, sekitar 30-50% beban kadmium disimpan di ginjal.

### 2.2.2 Timbal (Pb)

Sumber utama emisi antropogenik timbal dalam skala global termasuk pembakaran bahan bakar fosil dari, misalnya, lalu lintas, produksi logam non-besi, dan produksi besi dan baja. Beberapa kontribusi juga diberikan oleh produksi semen dan pembuangan limbah (Mallongi et al., 2022; Rauf et al., 2020). Timbal terikat pada partikulat debu dan cenderung berasosiasi

dengan partikel berukuran 0,2–1,0  $\mu\text{m}$  (diameter aerodinamis). Mode supermikron juga ada, tetapi kurang signifikan. Spesies utama saat emisi adalah klorida, oksida, dan sulfat. Secara khusus, pembakaran minyak melepaskan timbal sebagai timbal oksida ( $\text{PbO}$ ), sedangkan produksi logam non-ferro melepaskan timbal sulfat ( $\text{PbSO}_4$ ) dan  $\text{PbO}$ . Timbal diklorida ( $\text{PbCl}_2$ ) dipancarkan selama pembakaran batubara dan pembakaran sampah. Penghapusan timbal dari atmosfer terjadi melalui pemulungan basah dan pengendapan kering.

Bijih logam hasil pertambangan akan mengandung 3-10% timbal. Kadar tersebut dapat berubah menjadi 40% saat dimurnikan (Palar, 2012). Timbal akan berwarna abu-abu dan memiliki densitas yang tinggi dalam temperatur ruang ( $11,48 \text{ g/mL}^{-1}$ ) (Svehla, 1997). Unsur Pb digunakan di sektor industri dan berbagai kegunaan lain seperti komponen pembuatan baterai, bahan konstruksi, pipa, minyak, kosmetik dan cat (Mani et al., 2019). Pembakaran bensin bertimbal (*leaded gasoline*) juga merupakan sumber Pb di lingkungan. Penggunaan tetraetil yang telah dilarang tidak membuat negara berkembang berhenti menggunakannya sebagai *antiknock*. Studi tentang dampak cemaran timbal sering ditemukan berikatan dengan polusi udara, penurunan kognitif dimana populasi terdampak yaitu anak-anak. Upaya untuk menggambarkan semua sumber utama dan rute pemaparan timbal ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Sumber dan rute paparan timbal secara umum (Skerfving, 1991).

Pernapasan adalah jalur utama untuk pemaparan timbal pada pekerja di industri yang memproduksi, memurnikan, menggunakan atau membuang komponen timbal. Selain 20-30 mg/hari yang diserap dari makanan, air dan udara sekitar, selama delapan jam shift pekerja dapat menyerap sebanyak 400 mg timbal dan asupan yang signifikan dapat terjadi setelah menelan bahan partikulat yang dihirup (Scoullas et al., 2001). Timbal banyak terakumulasi di dalam darah anak-anak yang tinggal di dekat pabrik baterai timbal dan asam. Pada percobaan dengan tikus, jelas bahwa campuran As, Cd dan Pb menginduksi toksisitas sinergis dalam protein yang menyebabkan disfungsi perilaku dalam perkembangan tikus percobaan (Rai et al., 2010). Orang dewasa yang keracunan timbal selama masa kanak-kanak mengalami peningkatan tekanan darah, yang merupakan faktor risiko signifikan untuk

penyakit kardiovaskular dan kematian. Mekanisme non-fatal termasuk efek ginjal, anemia karena penghambatan beberapa enzim yang terlibat dalam sintesis hem, percepatan pematangan kerangka, perubahan kadar hormon dan parameter imunitas, dan ensefalopati (pada pajanan tinggi) dan berbagai penyakit lain pada sistem saraf, di antaranya defisit kognitif dan neurobehavioural pada anak-anak pada pajanan tingkat rendah Pb telah menjadi perhatian besar.

Pajanan Pb pada orang dewasa dalam jangka waktu yang lama akan menyebabkan gangguan syaraf dan penurunan kinerja kognitif (Wani et al., 2015). Timbal terakumulasi dalam tulang, dan konsentrasi timbal dalam tulang dapat ditentukan secara *in vivo* dengan metode non-invasif berdasarkan fluoresensi sinar-X. Dengan perputarannya yang lambat, adanya akumulasi timbal di tulang mencerminkan paparan timbal jangka panjang yang juga mencerminkan total beban tubuh, karena fraksi dominan (>90%) beban tubuh timbal ada di kerangka. Pajanan Pb telah menarik perhatian di seluruh dunia karena efek buruknya pada kognisi dan perilaku anak-anak.

Titik akhir (*end point*) dari toksisitas Pb yang paling sensitif adalah perkembangan saraf dan efek neurologis lainnya, efek kardiovaskular, dan efek ginjal. Paparan prenatal dari timbal dalam darah ibu yang melewati plasenta sangat penting karena status perkembangan otak dan sistem saraf mereka, serta karena penghalang darah-otak yang belum berkembang sempurna. Anak-anak dan wanita hamil dapat menyerap hingga 70% dari Pb yang tertelan, sedangkan orang dewasa biasanya menyerap hingga 20%. Orang dewasa pada akhirnya hanya dapat mempertahankan 1% Pb yang terserap, tetapi anak-anak cenderung mempertahankan lebih banyak daripada orang dewasa. Pada bayi sejak lahir hingga usia 2 tahun, sekitar 30% dari jumlah total Pb akan diserap.

Selain gangguan kognitif dan perilaku, penelitian toksikologi juga tertarik untuk menyelidiki perubahan neurobiologis yang disebabkan oleh



berbagai konsentrasi Pb di dalam otak. Palar (2012), menggolongkan Pb dalam darah orang dewasa menjadi beberapa bagian di Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Kategori Pb dalam darah orang dewasa

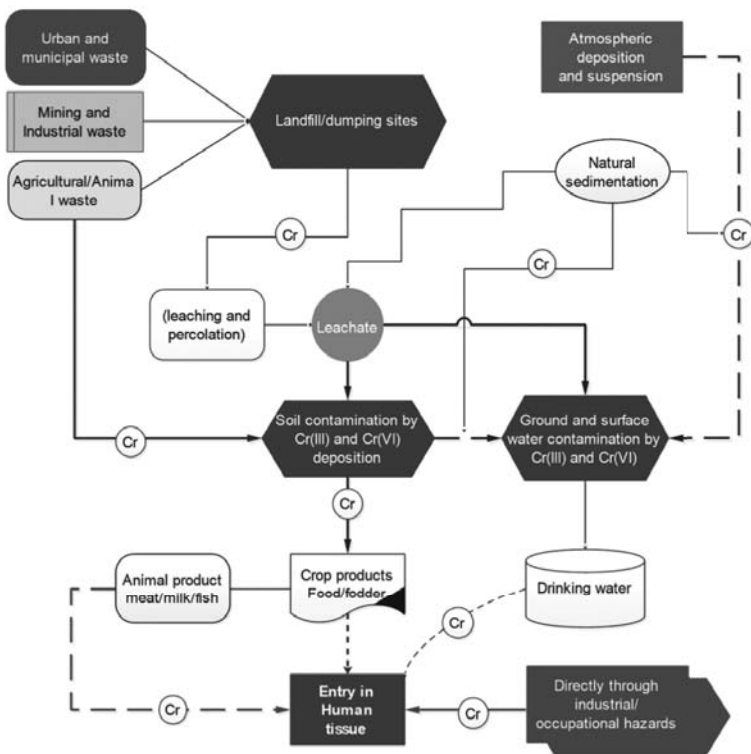
Kategori	$\mu\text{g Pb}/100 \text{ mL}$ darah	Deskripsi
A (normal)	< 40	Tidak ada pajanan atau berada dalam pajanan normal.
B (dapat ditoleransi)	40-8d	Terjadi pajanan namun masih bisa ditoleransi dan keadaan tubuh masih normal.
C (berlebih)	80-120	Intensitas penyerapan telah bertambah dan mulai menunjukkan tanda atau diagnosis keracunan.
D (tingkat bahaya)	> 120	Pajanan telah naik ke tahap bahaya dan tanda-tanda keracunan ringan dan berat telah terlihat.

### 2.2.3 Kromium (Cr)

Kromium dan nikel adalah logam pertama yang diklasifikasikan sebagai karsinogen oleh IARC (Nordberg et al., 2015). Cr dalam badan air masuk melalui dua cara, secara alamiah dan nonalamiah. Secara alami, logam ini muncul karena adanya erosi tanah dan batuan. Partikulat Cr yang ada di udara akan turun pada air hujan. Secara nonalami, Cr dihasilkan dari aktifitas industri dan limbah rumah tangga. Proses kimia yang terjadi di badan air menyebabkan unsur Cr tereduksi dari  $\text{Cr}^{6+}$  menjadi  $\text{Cr}^{3+}$  (Palar, 2012). Proses ini dapat terjadi dalam suasana asam, namun saat suasana basa ion  $\text{Cr}^{3+}$  akan mengendap.

Menelan Cr(VI) dalam jumlah besar menyebabkan gagal ginjal dan hati karena kerusakan sel darah. Penyembuhan luka atau goresan dihambat dengan menyentuh Cr(VI), dan beberapa masalah seperti kerusakan

keracunan sistemik atau bahkan luka bakar parah terjadi setelah kontak kulit dengan Cr(VI). Paparan Cr yang terhirup dapat menimbulkan risiko kanker paru-paru, hidung, dan sinus serta kerusakan mata. Kornhauser et al. (2002), melaporkan bahwa akumulasi Cr yang tinggi terdapat pada pekerja penyamakan kulit mengubah metabolisme besi. Efek kesehatan toksik dari Cr yang terdiagnosis pada manusia bergantung pada tingkat paparan dan dosis. Gambaran yang mewakili jalur masuknya Cr ke dalam sistem manusia digambarkan dalam Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Skema dan alur logam kromium mencapai sistem manusia.

Cr(III) dibutuhkan manusia dan berperan penting dalam metabolisme glukosa, protein, dan lemak. Selain itu, senyawa Cr(VI) dilaporkan memiliki bahaya kesehatan manusia, terutama melalui paparan inhalasi akut dan

kronis, meningkatkan masalah saluran pernapasan, yang merupakan organ target utama untuk toksisitas. Investigasi juga mengkonfirmasi bahwa bentuk Cr(VI) yang dihirup adalah karsinogen, yang berhasil meningkatkan risiko kanker paru-paru. Temuan penelitian pada hewan menunjukkan bahwa bentuk Cr(VI) dapat menyebabkan tumor paru-paru melalui paparan inhalasi jangka panjang. Batas aman pajanan kromium di industri semen adalah 1 mg/Nm<sup>3</sup>. Baku mutu tersebut merupakan emisi bagi usaha dan/atau kegiatan industri semen yang melakukan pemanfaatan limbah bahan berbahaya dan beracun.

Setiap logam memiliki sifat potensial reduksi untuk menggambarkan reaktivitas galvaniknya berdasarkan urutan kereaktifannya. Logam Cr, berbeda dengan logam jejak beracun lainnya seperti kadmium, timbal, merkuri, dan aluminium, hanya mendapat sedikit perhatian dari ilmuwan tanaman. Sifatnya yang kompleks telah menjadi rintangan utama dalam mengungkap mekanisme toksisitasnya pada tanaman. Dampak kontaminasi Cr dalam fisiologi tanaman tergantung pada spesiasi logam, yang bertanggung jawab atas mobilisasi, serapan berikutnya, dan toksisitas yang dihasilkan dalam sistem tanaman. Toksisitas Cr pada tanaman diamati pada berbagai tingkat, mulai dari penurunan hasil, melalui efek pada pertumbuhan daun dan akar, hingga penghambatan aktivitas enzimatik dan mutagenesis.

#### 2.2.4 Merkuri Hg

Raksa dalam bahasa latin disebut *hydrargyrum* yang berarti perak cair (Palar, 2012). Massa relatif atom Hg adalah 200,59 dan stabil di suhu ruang dalam bentuk cairan (Svehla, 1997). Dengan sifat tersebut logam ini digunakan sebagai pengukur suhu di thermometer. Unsur ini sangat beracun dalam bentuk uap yaitu senyawa metil-merkuri. Bentuk Hg tersedia dalam bentuk organik dan anorganik, dimana dalam bentuk anorganik logam ini disebut sebagai merkuri (Hg<sup>2+</sup>) dan merkuro (Hg<sup>+</sup>) (senyawa merkuro lebih toksik). Senyawa inorganik Hg seperti aril, alkil, dan alkoksi alkil sangat

beracun dibandingkan dalam bentuk lain. Dengan toksisitas tersebut, sekitar 99% diadsorpsi oleh dinding usus (dalam bentuk metil-merkuri) (Darmono, 2010). Sumber alami utama Hg adalah difusi dari mantel bumi melalui litosfer, penguapan dari permukaan laut, dan aktivitas panas bumi. Sumber Hg dari antropogenik terbesar dalam skala global adalah pembakaran batu bara dan bahan bakar fosil lainnya. Sumber lain termasuk produksi logam, produksi semen, pembuangan limbah dan kremasi.

Deposisi dari Hg tergantung pada pola curah hujan geografis dan parameter meteorologi lainnya, tetapi sebaliknya terdistribusi secara merata. Akibatnya, daerah terpencil seperti daerah kutub pun terpengaruh. Deposisi yang meningkat telah mengakibatkan peningkatan masuknya Hg ke danau. Di Eropa, hal ini telah didokumentasikan terutama di Skandinavia. Dibandingkan dengan konsentrasi latar belakang pra-industri (ditemukan di lapisan dalam sedimen), konsentrasi sedimen permukaan telah meningkat sekitar 5 kali lipat di Skandinavia selatan dan sekitar 2 kali lipat atau kurang di utara yang merupakan bagian paling akhir dari wilayah tersebut. Logam Hg terendapkan di tanah terutama dalam bentuk senyawa anorganik, yang mudah terikat pada bahan organik. Proses penting yang melibatkan Hg dalam tanah adalah revolatilisasi, metilasi, dan mobilisasi ke lingkungan akuatik. Revolatilisasi terjadi setelah reduksi Hg menjadi bentuk unsur, dan bergantung pada parameter lingkungan seperti sinar matahari, suhu dan kelembapan.

Ginjal mengandung metalotoinin yang merupakan pengikat logam berat yang juga ditemukan di hati janin dan ibu serta organ lainnya (ATSDR, 1999). Metalotionein juga berperan sebagai biomarker dalam uji paparan logam berat di manusia. Produksi metalotionein merangsang paparan merkuri di ginjal, semakin meningkat kadarnya, semakin banyak ion merkuri di dalam ginjal. Paparan kronis Hg dapat diketahui dari akumulasinya di dalam tubuh. Pada level kronis, jejak merkuri dapat ditemukan di rambut manusia (Sudarmaji, Sutomo, & Suwarni, 2004). Kadar Hg dalam rambut mempunyai hubungan yang bermakna dengan keluhan kesehatan pada

subyek penelitian. Ada kecenderungan semakin tinggi kadar Hg dalam rambut maka semakin tinggi terkena keluhan kesehatan dan atau semakin banyak jenis keluhan kesehatan yang timbul.

Kemungkinan efek buruk pada perkembangan saraf karena paparan metilmerkuri di janin memiliki arti penting bagi komunitas aborigin. Dari awal 1970-an hingga 1996, *Health Canada* terlibat dalam program pengambilan sampel untuk mendeteksi metilmerkuri dalam darah dan rambut di komunitas *First Nations* dan *Inuit* di seluruh Kanada. Level Hg dalam darah berada di bawah 20 µg/l (6 µg/g pada rambut) diklasifikasikan sebagai dalam kisaran yang dapat diterima, dan tingkat yang lebih besar dari 100 µg/l dalam darah (30 µg/g pada rambut) sebagai "berisiko". Konsentrasi Hg darah 200 µg/l adalah tingkat di mana 5% populasi yang paling sensitif mungkin mulai menunjukkan tanda-tanda awal toksisitas metilmerkuri, seperti parestesia.

Ketika senyawa merkuri anorganik tertelan, umumnya kurang dari 10% diserap melalui saluran usus, tetapi tingkat penyerapan gastrointestinal sangat bervariasi tergantung pada senyawa kimia yang dimaksud. Dalam kondisi langka tertentu, seperti adanya ulkus berdarah, hingga 40% dari Hg anorganik dapat diserap ke dalam tubuh melalui luka di perut dan/atau usus. Hg anorganik dalam jumlah yang lebih kecil dapat diserap melalui kulit, tetapi konsumsi adalah jalur utama ke dalam tubuh. Senyawa Hg anorganik yang diserap menumpuk di ginjal tetapi tidak melewati sawar plasenta atau darah-otak semudah Hg<sup>0</sup> atau metilmerkuri. Namun, Hg anorganik menumpuk di jaringan plasenta.

Efek neurotoksik telah dilaporkan di antara pekerja yang terpapar Hg selama bertahun-tahun. Orang-orang ini mendapat skor lebih rendah pada tes verbal dan memori daripada anggota kelompok kontrol, tetapi analisis statistik lanjutan tidak dilakukan. Laporan tentang paparan tak sengaja terhadap uap Hg konsentrasi tinggi, serta studi tentang populasi yang terpapar secara kronis pada konsentrasi tinggi yang berpotensi, telah

menunjukkan efek pada berbagai fungsi kognitif, sensorik, kepribadian, dan motorik.

## **2.3 Teknik Pengambilan Sampel Logam di Udara**

### **2.3.1 Laju Alir (*Flow rate*)**

Laju aliran dalam setiap prosedur pengambilan sampel partikulat di udara penting dalam menentukan akumulasi material pada filter, serta memastikan bahwa semua elemen disimpan pada filter. Diharapkan bahwa laju aliran yang rendah cocok untuk periode pengambilan sampel yang lebih lama dan laju aliran yang tinggi lebih sesuai untuk periode pengambilan sampel yang singkat. Pengambilan sampel pada laju aliran yang lebih rendah (3 L/menit) menghasilkan konsentrasi yang lebih tinggi pada filter daripada laju aliran yang lebih tinggi (13,67 L/menit) selama periode pengambilan sampel yang sama. Laju aliran sampler dikalibrasi setiap minggu menggunakan lubang kalibrasi.

### **2.3.2 Media Filter**

Jenis media filter berserat adalah cara yang paling ekonomis untuk mencapai pengumpulan partikel submikrometer dengan efisiensi tinggi pada konsentrasi debu rendah. Jenis filter yang paling penting untuk pengambilan sampel aerosol adalah filter membran berserat dan berpori (Hinds, 1999). Selain efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan, pemilihan filter untuk pengambilan sampel aerosol mungkin sangat bergantung pada metode analitik yang akan digunakan. Serat kaca dan filter ester selulosa jauh lebih sedikit terpengaruh oleh kelembapan dan usia, sedangkan filter polikarbonat, polivinil klorida, dan Teflon paling tidak terpengaruh. Jika partikel aerosol akan dianalisis dengan metode kimia, interferensi yang disebabkan oleh bahan filter atau kontaminan dalam filter harus dipertimbangkan.

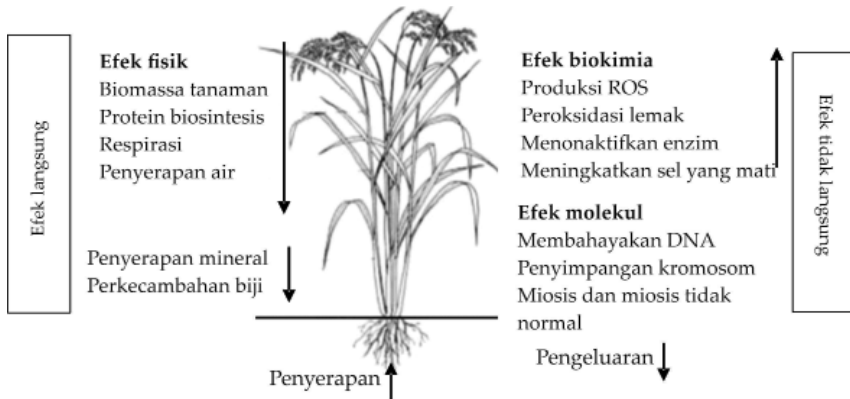
Perlu untuk memperhatikan saluran masuk dalam proses sampling untuk terletak jauh dari halangan apa pun yang dapat memengaruhi aliran udara, seperti dinding bangunan dan pohon, motor, dll. Oleh karena itu, udara dari pompa harus dipindahkan ke dalam tabung terpisah setidaknya 10 meter dari saluran masuk filter. Prosedur sampling mungkin agak berbeda dari satu sistem sampling udara yang lain. Oleh karena itu, prosedur pengambilan sampel operasi standar (SOP) harus didasarkan pada manual operator pengambil sampel. Prosedur ini juga bergantung pada apakah filter perlu diberi bobot untuk pengukuran awal.

Filter disimpan dalam kantong plastik dengan ritsleting saat diangkut antara laboratorium dan lapangan. Seseorang juga harus menggunakan pinset yang terbuat dari bahan bukan logam atau dilapisi teflon saat menyentuh filter. Jangan pernah menyentuh filter dengan jari. Setelah paparan, filter volume tinggi dilipat menjadi dua dengan sisi terbuka saling berhadapan, dimasukkan ke dalam kantong plastik dan dikirim ke laboratorium untuk dianalisis.

## 2.4 Risiko dan Kerusakan Ekologis

Limbah dari industri pelapisan (*coating*) mengandung sejumlah unsur logam berat. Logam-logam berat, khususnya, dapat menjadi racun bagi ikan dan juga berbahaya bagi kesehatan manusia. Arsenik, tembaga, timah, dan kadmium sering ditemukan di danau dan sungai dari udara dekat fasilitas pemancar. Zat-zat ini juga dapat memasuki saluran air dari limpasan timbunan terak, drainase tambang, dan limbah industri (Peirce et al., 1997). Logam berat dapat menghasilkan efek lingkungan yang berbeda untuk secara langsung memengaruhi toksisitas, migrasi dan siklusnya di alam (Xiang, Liu, Jiang, & Chen, 2019). Logam berat adalah salah satu pencemar lingkungan paling serius karena toksisitasnya yang tinggi, melimpah, mudah terakumulasi oleh berbagai organisme tanaman dan hewan (ACGIH, 2004). Tanaman mengambil logam berat dan menyerapnya dari udara serta dari

tanah yang terkontaminasi melalui sistem akar (Bahiru, 2017). Logam berat terserap oleh tanaman dan menimbulkan efek langsung dan tidak langsung sesuai Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Penyerapan logam berat di tumbuhan (Bhat et al., 2019).

Zat-zat logam berat yang tidak diinginkan (Cd, Pb, Hg, As, Cr) maupun logam berat esensial (Fe, I, Co, Cu, Mn, Mo, Se) berpotensi menimbulkan efek merugikan pada ternak secara langsung, tetapi juga dapat masuk ke dalam rantai makanan melalui konsumsi hewan dan dengan demikian merupakan risiko bagi manusia. Mengenai evaluasi tingkat paparan logam beracun atau dosis beracun, penting untuk mempertimbangkan bahwa asupan makanan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor: manajemen, jenis dan kualitas bahan baku, aditif, konsumsi tanah dan kontaminasi yang tidak disengaja. Episode toksisitas akut jarang terjadi, kecuali paparan yang tidak disengaja. Logam berat berpotensi berbahaya karena toksisitas, bioakumulasi, dan pembesaran biologisnya saat ditemukan di dalam jaringan hidup, dan disimpan lebih cepat daripada diekskresikan. Logam berat dianggap sebagai kontaminan atau zat yang tidak diinginkan (As, Cd, F, Pb, Hg) jika tidak sengaja ditambahkan ke makanan, tetapi dapat mencapai pakan dan rantai makanan di berbagai sumber.



Pengendalian adsorpsi logam pada hewan dapat menjadi strategi yang efektif untuk mengurangi risiko kesehatan manusia terkait dengan konsumsi produk asal hewan. Akumulasi logam berat sangat bervariasi dari satu jaringan ke jaringan lain di dalam hewan, dan di antara hewan. Konsentrasi As yang lebih tinggi telah terdeteksi pada daging dada, bagian penting dari unggas yang dapat dimakan; dan ginjal dan ampela masing-masing menunjukkan kandungan Cd dan Cr tertinggi. Korelasi positif antara asupan makanan dan konsentrasi pada organ broiler (otot, hati, dan kulit) juga telah dibuktikan untuk logam esensial seperti Fe dan Mn.

## **2.5 Faktor Toksisitas Paparan Logam di Udara**

### **2.5.1 Umur**

Usia lanjut adalah faktor risiko yang signifikan untuk kadar logam yang lebih tinggi karena bioakumulasi (Ahn, Kim, Lee, Oh, & Kim, 2019). Ditemukan bahwa kadar timbal dan kadmium dalam darah meningkat seiring bertambahnya usia. Pada anak-anak, bioakumulasi logam meskipun dalam konsentrasi rendah dapat menimbulkan efek jangka panjang yaitu gangguan komposisi dan perkembangan tulang. Anak-anak merupakan subjek yang paling rentan terhadap keberadaan logam berat di lingkungan. Hal ini karena kadmium merupakan racun kumulatif dan memiliki paruh waktu yang sangat lama di dalam tubuh, paparan terhadap anak-anak dalam jumlah rendah sekalipun dapat memiliki konsekuensi jangka panjang. Studi menunjukkan bahwa anak-anak mungkin lebih rentan daripada orang dewasa pada kerusakan tulang yang diinduksi kadmium (ATSDR, 2012b, 2012a; Waseem & Arshad, 2016).

Paparan masa kecil terhadap beberapa logam dapat mengakibatkan kesulitan belajar, gangguan memori, kerusakan sistem saraf, dan masalah perilaku seperti agresivitas dan hiperaktif. Pada dosis yang lebih tinggi, logam berat dapat menyebabkan kerusakan otak yang tidak dapat diperbaiki. Penting juga untuk mempertimbangkan bahwa anak-anak menerima dosis

logam yang lebih tinggi dari makanan daripada orang dewasa, karena mereka mengonsumsi lebih banyak makanan terkait dengan BB mereka. Probabilitas bahwa suatu populasi akan terpapar dan dirugikan bisa lebih tinggi untuk logam dengan toksisitas sedang tetapi tersebar luas sehingga ada risiko paparan yang lebih tinggi.

### 2.5.2 Aktifitas

Aktifitas fisik (berjalan dan berolahraga) dapat menyebabkan variasi antar individu dalam penyerapan kontaminan udara dan mempengaruhi konsentrasi logam dalam darah. Paparan tinggi terhadap arsenik dan logam berat telah ditemukan terkait dengan beberapa jenis kanker, termasuk kandung kemih, usus besar, ginjal, hati, paru-paru, kulit dan prostat (Núñez et al., 2016). Di Nagpur, India, peningkatan polusi udara dan aerosol yang membawa dan meningkatkan konsentrasi logam Zn, Pb, Fe, Ni, Cr dan Cd diakibatkan oleh peningkatan jumlah kendaraan dan aktifitas manusia di siang-malam hari. Hal ini menyebabkan manusia yang beraktifitas di jam tersebut akan berisiko untuk terkena dampak negatif.

### 2.5.3 Status Gizi

Defisit nutrisi seng (Zn) meningkatkan kerentanan terhadap infeksi, sedangkan suplementasi seng dapat mencegah atau mengurangi tingkat infeksi. Sehingga apabila individu kekurangan Zn akan lebih mudah terpapar debu organik yang mengandung produk sampingan bakteri yang direkapitulasi dalam makrofag (Haase & Rink, 2009; Knoell et al., 2019). Pada penelitian di Modena, Italia, disebutkan bahwa kemungkinan peran seng dan paparan tembaga dan besi serta keadaan status gizi serta tingkat racun dalam logam dapat mempengaruhi risiko penyakit *cutaneous meloma*, kanker kulit yang sangat berbahaya (Vinceti et al., 2005). Apabila seseorang mengalami defisit Ca dalam tubuh dan disaat yang bersamaan akumulasi dan paparan logam berat Pb tinggi, maka kemungkinan ion Ca akan

digantikan oleh Pb sehingga menyebabkan tulang akan keropos karena akumulasi Pb dalam tubuh (Darmono, 1995).

#### 2.5.4 Data Konsumsi

Peminum berat memiliki nilai tingkat pajanan Cd dan Pb yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan yang bukan peminum yang ditunjang dengan polusi udara, tetapi penurunan konsentrasi polutan antara 2008-2017 di Korea Selatan menyatakan bahwa jumlah individu yang terpapar untuk yang bukan peminum mulai menurun (Ahn et al., 2019). Anak-anak menerima dosis logam yang lebih tinggi dari makanan daripada orang dewasa, karena mereka mengkonsumsi lebih banyak makanan (terkait dengan perbedaan berat badan) (Thirulogachandar et al., 2014). Kadar yang tinggi Pb/Cd dalam darah diiringi kadar gizi rendah menyebabkan kerusakan sistem organ subklinis seperti hemopoietik, ginjal, sistem saraf pada neonatus, anak-anak, wanita pasca-melahirkan dan populasi yang memiliki kontak tertentu sesuai dengan pekerjaan mereka (Bharatraj & Yathapu, 2018). Kadmium dalam beras (50 ng/g) secara signifikan lebih tinggi daripada makanan yang berasal dari gandum seperti roti (16 ng/g), tepung (19,3ng/g) dan mie (4 ng/g) (Shimbo et al., 2001; Wai et al., 2017).

Dari 103.060 kehamilan di Jepang, 93.739 pasangan ibu-bayi dianalisis. Model regresi linier menunjukkan bahwa timbal, selenium, kadmium, dan mangan—tetapi bukan merkuri—berhubungan dengan berat badan. Kadmium dikaitkan dengan panjang dan lingkar dada dan merkuri dikaitkan dengan lingkar kepala. Perhitungan kuantitatif mengungkapkan bahwa mangan meningkatkan berat lahir bayi, panjang, lingkar kepala, dan lingkar dada. Timbal adalah faktor negatif terkuat untuk berat lahir, panjang, lingkar kepala, dan lingkar dada bayi.

### 2.5.5 Jenis Kelamin

Pekerja terkena dermatitis lebih sering terjadi pada pria daripada wanita akibat paparan Cu (Kridin et al., 2016). Kemudian, wanita menopause memiliki tingkat risiko paparan logam yang lebih tinggi daripada wanita pra-menopause (Ahn et al., 2019). Akumulasi timbal dalam darah lebih tinggi pada wanita post-menopause tanpa HRT (*Hormone Replacement System*, atau treatment yang melibatkan kinerja hormon) daripada wanita yang menerima treatment HRT. Kadar timbal dalam darah ditemukan berhubungan positif dengan indeks massa tubuh (BMI) dan pengukuran obesitas yang hanya terjadi pada wanita (J. Wang et al., 2017). Berat lahir ditemukan berhubungan dengan kadar timbal ibu pada bayi laki-laki yang baru lahir. Anak laki-laki lebih rentan untuk terpapar daripada anak perempuan. Pada wanita ditemukan bahwa kadar merkuri yang tinggi di urin daripada laki-laki di Spanyol (d disesuaikan kreatinin). Paparan uap Hg tingkat tinggi dapat menyebabkan kematian, sementara paparan dosis rendah yang kronis dapat merusak sistem saraf secara permanen dan paparan yang berkelanjutan dapat menyebabkan tremor, kecemasan, dan kehilangan ingatan. Paparan Hg juga dapat mempengaruhi fungsi reproduksi pada pria, dan sangat berbahaya bagi wanita.

### 2.5.6 Pekerjaan

Prevalensi tinggi sesak napas, hidung tersumbat dan bersin di antara pekerja pabrik semen lebih tinggi daripada non pekerja. Penurunan fungsi paru-paru mungkin terkait dengan paparan debu semen yang tinggi, khususnya kromium (Chou et al., 2016). Rata-rata paparan merkuri pada orang dewasa di Spanyol menunjukkan bahwa individu yang bekerja di sektor layanan publik memiliki risiko terpapar merkuri daripada mereka yang bekerja di sektor lain. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa durasi paparan (DE) memiliki dampak terbesar pada kerusakan kesehatan oleh partikulat debu batubara, diikuti oleh waktu paparan (ET), laju inhalasi (IR)

dan konsentrasi debu (C) (Tong et al., 2019). Konsentrasi logam berat dalam darah tidak hanya mencerminkan pajanan, tetapi juga dipengaruhi oleh beban tubuh, terutama setelah pajanan yang lama. Sehingga pekerja dengan kontak yang lebih lama dengan logam berat memiliki risiko penyakit kanker yang lebih tinggi.

Paparan kromium dan logam lain di tempat kerja terjadi terutama melalui penghirupan dan penyerapan kulit di lingkungan kerja, termasuk pembuatan senyawa kromium, pelapisan listrik, penyamakan kulit, dan pengelasan. Studi sebelumnya tentang toksisitas Cr(VI) terutama berfokus pada paparan kromium tingkat tinggi yang relatif tinggi, seperti pelapisan krom, pembuatan dan pemolesan senyawa Cr. Pada senyawa Hg, pekerja paling sering terpapar Hg dengan menghirup debu atau uap yang mengandung unsur tersebut. Pelepasan ini dapat terjadi ketika instrumen atau peralatan yang mengandung Hg pecah, seperti bola lampu neon, pengukur tekanan di fasilitas pengolahan air, pengukur tekanan darah dan instrumen medis lainnya dan pipa ledeng, pemanas, serta peralatan pendingin udara semuanya merupakan sumber potensial.

Tabel 2.2 Batas Konsentrasi Logam di Udara

Logam	Konsentrasi Udara			EPA			ATSDR			Oregon RBC
	Ambien (U.S)		RfC	IRIS (10 <sup>-4</sup> kanker)		Non-karsinogenik	Akut	Intermediet	Kronis	
	Rural	Urban		Industri	Risiko karsinogenik					
Kadmium	0,001	0,008	0,6	0,01	0,0006	0,0014	0,03		0,01	0,0014
Kromium	0,002	0,02	0,4			0,01		0,1		
Kromium VI	0,0001	0,0016	0,0153	0,08	0,00008	0,000011		0,005	0,005	0,000029
Tembaga	0,01	0,29	0,87							
Timbal	0,02	0,04	0,76			0,03				

Tabel 2.3 Reference doses (RfD) dan Cancer Slope Factor (CSF) oleh USEPA, IRIS dan DEA

Nama	Oral RfD (mg/kg-hari)	Inhalasi RfC(mg/kg-hari)	CSF
Kadmium	5.00E-04	5.70E-05	6.3 (Inh), 1.5 (Oral)
Kromium (VI)	3.00E-03	3.00E-05	290 (Inh), 5.00E-04 (Oral)
Tembaga	3.700E-03	ND	8.50E-03 (Oral)
Timbal	3.60E-03	4.93E-4 (IRIS)	4.2E-2 (Inh), 8.5E-3 (Oral)
Merkuri	1.0E-4	3.0E-4	-

## 2.6 Kesimpulan

Unsur logam yang terserap ke *particulate matter* (PM) juga dapat terdeposisi ke tanah, badan air, dan daun tanaman melalui deposisi basah dan kering. Partikular logam dapat terakumulasi pada tumbuhan atau hewan melalui proses biokimia dan manusia kemudian dapat terpapar melalui konsumsi tanaman atau hewan yang terkontaminasi. Untuk mengendalikan pencemaran logam di atmosfer, penting untuk melakukan manajemen risiko lingkungan yang efektif. Model evaluasi cepat pada distribusi spatiotemporal logam berat dan program peringatan dini praktis dapat dikembangkan dengan menggabungkan data pemantauan dengan penelitian interdisipliner, seperti model difusi polutan atmosfer, investigasi epidemiologi, eksperimen toksikologi, dan sistem informasi geografis. Penelitian ilmiah terbaru tentang logam di PM telah difokuskan pada tingkat polusi, analisis sumber, variasi temporal, distribusi spasial, dan efek kesehatan dari logam yang terserap ke PM. Karena potensinya untuk aktivitas oksidatif dan produksi spesies oksigen reaktif (ROS), logam telah lama diduga menjadi komponen utama dalam menghasilkan efek kesehatan yang merugikan, khususnya penyakit pernapasan, gangguan kulit, dan penyakit kanker dalam paparan jangka panjang.

## Daftar Pustaka

- ACGIH. (2004). Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. In *ACGIH Worldwide, Signature Publications*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Ahn, J., Kim, N. S., Lee, B. K., Oh, I., & Kim, Y. (2019). Changes of atmospheric and blood concentrations of lead and cadmium in the general population of South Korea from 2008 to 2017. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122096>

- ATSDR. (1999). Toxicological Profile for Mercury. In *U.S. Department of Health and Human Services* (Issue March).
- ATSDR. (2012a). ToxGuide for Cadmium. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, 2.
- ATSDR. (2012b). Toxicological Profile for Cadmium. *U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES*. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp5.pdf>
- Bahiru, D. B. (2017). Level of Some Toxic Heavy Metal in Selected Vegetables, Soil and Wastewater around Eastern Industry Zone, Central Ethiopia. In *Haramaya University*. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.ampbs.2017.04.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.010><http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075><http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0308555101><http://www.treemediation.com/technical/phytoremed>
- Bari, Md. A., & Kindzierski, W. B. (2016). Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in Edmonton, Canada: Source apportionment and potential risk for human health. *Environmental Pollution*, 218, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.014>
- Bharatraj, K., & Yathapu, R. (2018). Nutrition-pollution interaction: An emerging research area. *Indian Journal Medical Research*. [https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR\\_1733\\_18](https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_1733_18) Nutrition-pollution
- Bhat, J. A., Shivaraj, S. M., Singh, P., Navadagi, D. B., Tripathi, D. K., Dash, P. K., Solanke, A. U., Sonah, H., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants8030071>
- Chen, Y., Fung, J. C. H., Chen, D., Shen, J., & Lu, X. (2019). Source and exposure apportionments of ambient PM<sub>2.5</sub> under different



- synoptic patterns in the Pearl River Delta region. *Chemosphere*, 236, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.236>
- Chham, E., Piñero-García, F., González-Rodelas, P., & Ferro-García, M. A. (2017). Impact of air masses on the distribution of 210Pb in the southeast of Iberian Peninsula air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 177, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.030>
- Chou, T. C., Wang, P. C., Wu, J. de, & Sheu, S. C. (2016). Chromium-induced skin damage among Taiwanese cement workers. *Toxicology and Industrial Health*, 32(10), 1745–1751. <https://doi.org/10.1177/0748233715584699>
- Darmono. (1995). *Logam dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*. Penerbit Universitas Indonesia (UI Press).
- Darmono. (2010). *Lingkungan Hidup dan Pencemaran, Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam*. Penerbit Universitas Indonesia.
- Daud, A., & Dullah, A. A. (2013). *Perspektif Analisis Risiko Lingkungan dan Kesehatan*. Smart Writing.
- Díaz, R. V., & Rosa Dominguez, E. (2009). Health risk by inhalation of PM2.5 in the metropolitan zone of the City of Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(3), 866–871. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.09.014>
- Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., & Wang, X. (2016). The health effects of ambient PM2.5 and potential mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.030>
- Fujii, T., Hayashi, S., Hogg, J. C., Vincent, R., & van Eeden, S. F. (2001). Particulate Matter Induces Cytokine Expression in Human Bronchial Epithelial Cells. *American Journal of Respiratory Cell*

- and Molecular Biology*, 25(3), 265–271. <https://doi.org/10.1165/ajrcmb.25.3.4445>
- Gan, Y., Huang, X., Li, S., Liu, N., Li, Y. C., Freidenreich, A., Wang, W., Wang, R., & Dai, J. (2019). Source quantification and potential risk of mercury, cadmium, arsenic, lead, and chromium in farmland soils of Yellow River Delta. *Journal of Cleaner Production*, 221, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.157>
- Haase, H., & Rink, L. (2009). Functional Significance of Zinc-Related Signaling Pathways in Immune Cells. *Annual Review of Nutrition*, 29(1), 133–152. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-080508-141119>
- Han, Q., Liu, Y., Feng, X., Mao, P., Sun, A., Wang, M., & Wang, M. (2021). Pollution effect assessment of industrial activities on potentially toxic metal distribution in windowsill dust and surface soil in central China. *Science of The Total Environment*, 759, 144023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144023>
- Hime, N., Marks, G., & Cowie, C. (2018). A Comparison of the Health Effects of Ambient Particulate Matter Air Pollution from Five Emission Sources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1206. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061206>
- Jan, R., Roy, R., Yadav, S., & Satsangi, P. G. (2017). Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. *Building and Environment*, 111, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>
- Jeffery, G. H., Bassett, J., Mendham, J., & Denney, R. C. (1990). *Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis 5th Edition* (Vol. 14, Issue 2, p. 100). Longman Scientific & Technical. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(90\)90087-8](https://doi.org/10.1016/0160-9327(90)90087-8)

- Kibble, A., & Harrison, R. (2005). Point sources of air pollution. *Occupational Medicine*, 55(6), 425–431. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi138>
- Knoell, D. L., Smith, D. A., Sapkota, M., Heires, A. J., Hanson, C. K., Smith, L. M., Poole, J. A., Wyatt, T. A., & Romberger, D. J. (2019). Insufficient zinc intake enhances lung inflammation in response to agricultural organic dust exposure. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 70, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.04.007>
- Kridin, K., Bergman, R., Khamaisi, M., Zelber-Sagi, S., & Weltfriend, S. (2016). Cement-Induced Chromate Occupational Allergic Contact Dermatitis. *Dermatitis*, 27(4), 208–214. <https://doi.org/10.1097/DER.0000000000000203>
- Kumar, N., Johnson, J., Yarwood, G., Woo, J.-H., Kim, Y., Park, R. J., Jeong, J. I., Kang, S., Chun, S., & Knipping, E. (2022). Contributions of domestic sources to PM<sub>2.5</sub> in South Korea. *Atmospheric Environment*, 287, 119273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119273>
- Li, G., Zhang, H., Hu, M., He, J., Yang, W., Zhao, H., Zhu, Z., Zhu, J., & Huang, F. (2022). Associations of combined exposures to ambient temperature, air pollution, and green space with hypertension in rural areas of Anhui Province, China: A cross-sectional study. *Environmental Research*, 204, 112370. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112370>
- Mallongi, A., Astuti, R. D. P., Amiruddin, R., Hatta, M., & Rauf, A. U. (2022). Identification source and human health risk assessment of potentially toxic metal in soil samples around karst watershed of Pangkajene, Indonesia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100634. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100634>

- Mani, M. S., Kabekkodu, S. P., Joshi, M. B., & Dsouza, H. S. (2019). Ecogenetics of lead toxicity and its influence on risk assessment. *Human and Experimental Toxicology*. <https://doi.org/10.1177/0960327119851253>
- Manojkumar, N., Srimuruganandam, B., & Shiva Nagendra, S. M. (2019). Application of multiple-path particle dosimetry model for quantifying age specified deposition of particulate matter in human airway. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.091>
- Maret, W., & Moulis, J.-M. (2013). The Bioinorganic Chemistry of Cadmium in the Context of Its Tozixity. In A. Sigel & H. Sigel (Eds.), *Cadmium: From Toxicity to Essentiality*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8>
- National Park Service U.S Department of the Interior. (2018). *Where Does Air Pollution Come From?* <https://www.nps.gov/subjects/air/sources.htm>
- Nordberg, G., Fowler, B., & Nordberg, M. (2015). *Handbook on the Toxicology of Metals Fourth Edition: Vol. I* (B. A. Fowler, G. F. Nordberg, & M. Nordberg, Eds.; IV). Elsevier.
- Núñez, O., Fernández-Navarro, P., Martín-Méndez, I., Bel-Lan, A., Locutura, J. F., & López-Abente, G. (2016). Arsenic and chromium topsoil levels and cancer mortality in Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(17), 17664–17675. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6806-y>
- OCDE. (2016). *The economic consequences of outdoor air pollution. Policy highlights*. 116. <https://doi.org/10.1787/9789264257474-en>
- Palar, H. (2012). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Penerbit Rineka Cipta.

- Peirce, J., Weiner, R. F., & Vesilind, P. A. (1997). *Environmental Pollution Control* (Vol. 4).
- Purushothaman, S. K., Selvam, J., & Muthunarayanan, V. (2021). Ambient indoor air pollution and its consecutive effect on environment materials and health. *Materials Today: Proceedings*, 37, 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.483>
- Putri, R. M., Amin, M., Suciari, T. F., al Fattah Faisal, M., Auliani, R., Ikemori, F., Wada, M., Hata, M., Tekasakul, P., & Furuuchi, M. (2021). Site-specific variation in mass concentration and chemical components in ambient nanoparticles (PM0.1) in North Sumatra Province-Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101062. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101062>
- Rai, A., Maurya, S. K., Khare, P., Srivastava, A., & Bandyopadhyay, S. (2010). Characterization of Developmental Neurotoxicity of As, Cd, and Pb Mixture: Synergistic Action of Metal Mixture in Glial and Neuronal Functions. *Toxicological Sciences*, 118(2), 586–601. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq266>
- Raimi, I., Komolafe, B., Agboola, O., Mugivhisa, L., & Olowoyo, J. (2019). Influence of Wind Direction on the Level of Trace Metals in Plants Collected around a Quarry Site in South Africa. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(5), 3385–3393. <https://doi.org/10.15244/pjoes/94846>
- Rauf, A. U., Mallongi, A., & Astuti, R. D. P. (2020). Heavy Metal Contributions on Human Skin Disease near Cement Plant: A Systematic Review. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 8(F), 117–122. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2020.4396>
- Sarkar, A., Deb, S., Ghosh, S., Mandal, S., Quazi, S. A., Kushwaha, A., Hoque, A., & Choudhury, A. (2022). Impact of anthropogenic pollution on

- soil properties in and around a town in Eastern India. *Geoderma Regional*, 28, e00462. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00462>
- Scoullou, M. J., Vonkeman, G. H., Thornton, I., & Makuch, Z. (2001). *Handbook for Sustainable Heavy Metals Policy and Regulation* (Volume 31). Springer-Science+Business Media, BV. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0403-9> Cover
- Shimbo, S., Zhang, Z. W., Watanabe, T., Nakatsuka, H., Matsuda-Inoguchi, N., Higashikawa, K., & Ikeda, M. (2001). Cadmium and lead contents in rice and other cereal products in Japan in 1998-2000. *Science of the Total Environment*, 281(1-3), 165-175. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00844-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00844-0)
- Skerfving. (1991). *Skerfving S (1991). Exposure to mercury in the population.* Plenum Press.
- Sudarmaji, Sutomo, A. H., & Suwarni, A. (2004). Konsumsi Ikan Laut, Kadar Mercury Dalam Rambut, Dan Kesehatan Nelayan Di Pantai Kenjeran Surabaya. *Manusia Dan Lingkungan*, 11(1), 134-142.
- Svehla, G. (1997). *Textbook of Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis* (Vol. 343, Issue 3). Longman Group Limited. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(97\)89603-1](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(97)89603-1)
- Thirulogachandar, A., Rajeswari, M., & Ramya, S. (2014). Assessment of Heavy Metals in Gallus and their Impacts on Human. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(6), 1-8. [www.ijsrp.org](http://www.ijsrp.org)
- Tong, R., Cheng, M., Yang, X., Yang, Y., & Shi, M. (2019). Exposure levels and health damage assessment of dust in a coal mine of Shanxi Province, China. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.022>

- Toro A., R., Morales S., R. G. E., Canales, M., Gonzalez-Rojas, C., & Leiva G., M. A. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment*, 79, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.004>
- Vinceti, M., Bassissi, S., Malagoli, C., Pellacani, G., Alber, D., Bergomi, M., & Seidenari, S. (2005). Environmental exposure to trace elements and risk of cutaneous melanoma. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15(5), 458–462. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500423>
- Wai, K. M., Mar, O., Kosaka, S., Umemura, M., & Watanabe, C. (2017). Prenatal heavy metal exposure and adverse birth outcomes in Myanmar: A birth-cohort study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph14111339>
- Wang, J., Gao, Z. Y., Yan, J., Ying, X. L., Tong, S. L., & Yan, C. H. (2017). Sex differences in the effects of prenatal lead exposure on birth outcomes. *Environmental Pollution*, 225, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.031>
- Wang, Z., Zhong, S., He, H., Peng, Z.-R., & Cai, M. (2018). Fine-scale variations in PM<sub>2.5</sub> and black carbon concentrations and corresponding influential factors at an urban road intersection. *Building and Environment*, 141, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.042>
- Wani, A. L., Ara, A., & Usmani, J. A. (2015). Lead toxicity: A review. *Interdisciplinary Toxicology*, 8(2), 55–64. <https://doi.org/10.1515/intox-2015-0009>
- Waseem, A., & Arshad, J. (2016). A review of Human Biomonitoring studies of trace elements in Pakistan. In *Chemosphere* (Vol. 163, pp. 153–176). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.011>

- Wei, P., Brimblecombe, P., Yang, F., Anand, A., Xing, Y., Sun, L., Sun, Y., Chu, M., & Ning, Z. (2021). Determination of local traffic emission and non-local background source contribution to on-road air pollution using fixed-route mobile air sensor network. *Environmental Pollution*, 290, 118055. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118055>
- WHO. (2000). *Guidelines for Air Quality*. WHO.
- WHO. (2019). *World Health Statistics 2019*.
- Xiang, L., Liu, P., Jiang, X., & Chen, P. (2019). Health risk assessment and spatial distribution characteristics of heavy metal pollution in rice samples from a surrounding hydrometallurgy plant area in No. 721 uranium mining, East China. *Journal of Geochemical Exploration*, 207(April), 106360. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106360>
- Xie, W., Peng, C., Wang, H., & Chen, W. (2017). Health risk assessment of trace metals in various environmental media, crops and human hair from a mining affected area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121595>
- Yadegarnia, F., Id, N., Azimzadeh, H., Arani, A. M., Id, A. S., & Id, B. K. (2019). Ecological risk assessment of heavy metals from cement factory dust. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 6(2), 129–137. <https://doi.org/10.15171/EHEM.2019.15>
- Zhang, Q., Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Allan, J. D., Coe, H., Ulbrich, I., Alfarra, M. R., Takami, A., Middlebrook, A. M., Sun, Y. L., Dzepina, K., Dunlea, E., Docherty, K., DeCarlo, P. F., Salcedo, D., Onasch, T., Jayne, J. T., Miyoshi, T., Shimojo, A., ... Worsnop, D. R. (2007). Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes. *Geophysical Research Letters*, 34(13), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007GL029979>





# BAB 3

## **POLISIKLIK AROMATIK HIDROKARBON (PAH)**

### **3.1 Definisi PAH**

Polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) adalah kelompok besar senyawa organik yang mengandung dua atau lebih cincin aromatik (benzena) yang menyatu. Sumber antropogenik utama dari emisi PAH adalah pembakaran tidak sempurna atau pirolisis bahan organik, seperti emisi dari bahan bakar fosil, biofuel (misalnya limbah kayu atau pertanian), knalpot mobil, emisi dari pemanasan dan memasak rumah tangga, dan asap tembakau. (WHO, 2000). Keberadaannya di udara yang kita hirup sangat besar selama beberapa abad terakhir. Bukti ilmiah saat ini menunjukkan bahwa PAH di udara ambien dikaitkan dengan peningkatan kejadian kanker pada populasi yang terpapar. PAH diklasifikasikan sebagai senyawa karsinogenik yang dapat menyebabkan kerusakan DNA secara langsung.

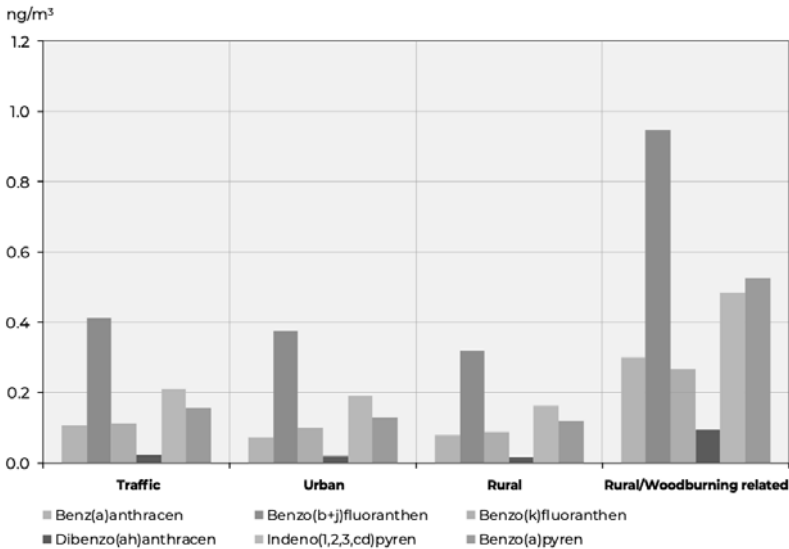
Manusia terpapar PAH melalui inhalasi, paparan kulit atau konsumsi makanan yang terkontaminasi PAH. Senyawa PAH yang mengandung lima atau lebih cincin aromatik sebagian besar ditemukan terikat pada materi partikulat (PM), sedangkan PAH yang mengandung hingga empat cincin aromatik sebagian besar ditemukan dalam fase gas. Paparan manusia terhadap PAH dapat terjadi dari inhalasi, paparan kulit atau konsumsi

makanan yang terkontaminasi PAH. Asupan makanan merupakan sumber utama asupan PAH, terutama untuk PAH yang lebih besar dengan empat hingga enam cincin aromatik: asupan PAH harian jauh lebih kecil melalui inhalasi ke saluran pernapasan daripada melalui konsumsi makanan.

Tanaman pangan dapat menyerap PAH dari tanah atau melalui pengendapan atmosfer melalui sistem akarnya. Sumber PAH dalam makanan terkait dengan proses memasak yang berbeda; misalnya, memanggang, memanggang, memanggang, menggoreng, dan memanggang dapat berkontribusi pada pembentukan PAH. Selain itu, jika kadar PAH meningkat melalui kontaminasi dari lapisan *tar* batubara pada pipa air, asupan PAH dari air minum mungkin sama atau bahkan melebihi asupan dari makanan (Armstrong et al., 2004; WHO, 2021).

### 3.2 Sumber dan Jejak PAH di Udara

Secara umum, PAH masuk ke lingkungan melalui berbagai rute dan biasanya ditemukan sebagai campuran yang mengandung dua atau lebih senyawa ini, misalnya dalam bentuk jelaga. Banyak PAH di udara ambien bersifat karsinogenik dan penilaian ulang baru-baru ini terhadap potensi karsinogeniknya menyebabkan B[a]P menjadi ditingkatkan menjadi karsinogen manusia Grup 1 (IARC MONOGRAPH, 2020). Dengan demikian ada kekhawatiran tentang hubungan antara pajanan PAH di udara ambien dan potensi berkontribusi terhadap kejadian kanker pada manusia. Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA) memantau 16 PAH prioritas di udara karena masalah kesehatan, diantaranya: naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene, fluorene, anthracene, phenanthrene, fluoranthene, pyrene, chrysene, benz[a] anthracene, benzo[b] fluoranthene, benzo[k] fluoranthene, B[a]P, indeno[1,2,3-cd]pyrene, benzo[g,h,i]-perylene, dan dibenz[a,h]antrasena (berurutan jumlah cincin aromatik per struktur). Berdasarkan sumber emisi, konsentrasi PAH dalam berbagai sumber ditunjukkan di Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Konsentrasi rata-rata PAH berdasarkan sumber emisi (WHO, 2021).

Senyawa PAH dengan berat molekul rendah lebih umum ditemukan sebagai uap di troposfer, PAH juga dapat ada dalam fase partikulat melalui kondensasi setelah emisi. Sebaliknya, PAH dengan berat molekul tinggi dominan ditemukan dalam fase partikulat. Oleh karena itu, ketika suhu sekitar meningkat, kesetimbangan bergeser ke arah PAH dalam fase uap. Ada juga beberapa ketergantungan, setidaknya dalam jangka pendek, rasio partisi gas terhadap partikel pada sumber emisi dan pertimbangan kimia atmosfer dan meteorologi lainnya.

Sifat fisik PAH bervariasi dengan berat dan struktur molekulnya. Tekanan uap PAHs menurun dengan meningkatnya berat molekul (Akyüz & Çabuk, 2010). PAH sangat lipofilik dan karena itu larut dalam pelarut organik. Selain itu, kelarutan dalam air menurun untuk setiap cincin tambahan yang ada di PAH. Senyawa PAH juga menampilkan sifat lain seperti kepekaan cahaya, tahan panas, konduktivitas, kemampuan memancarkan, ketahanan korosi, dan aksi fisiologis. PAH memiliki spektrum serapan UV yang sangat

khas. Karena setiap struktur cincin memiliki spektrum UV yang unik, setiap isomer menunjukkan spektrum serapan UV yang unik. Hal ini sangat berguna dalam identifikasi PAH. Sebagian besar PAH juga berpendar, memancarkan panjang gelombang cahaya yang khas ketika mereka tereksitasi (Masih et al., 2010). Meskipun efek kesehatan dari masing-masing PAH berbeda, beberapa PAH telah diidentifikasi menjadi perhatian terbesar karena efek yang sangat buruk pada manusia.

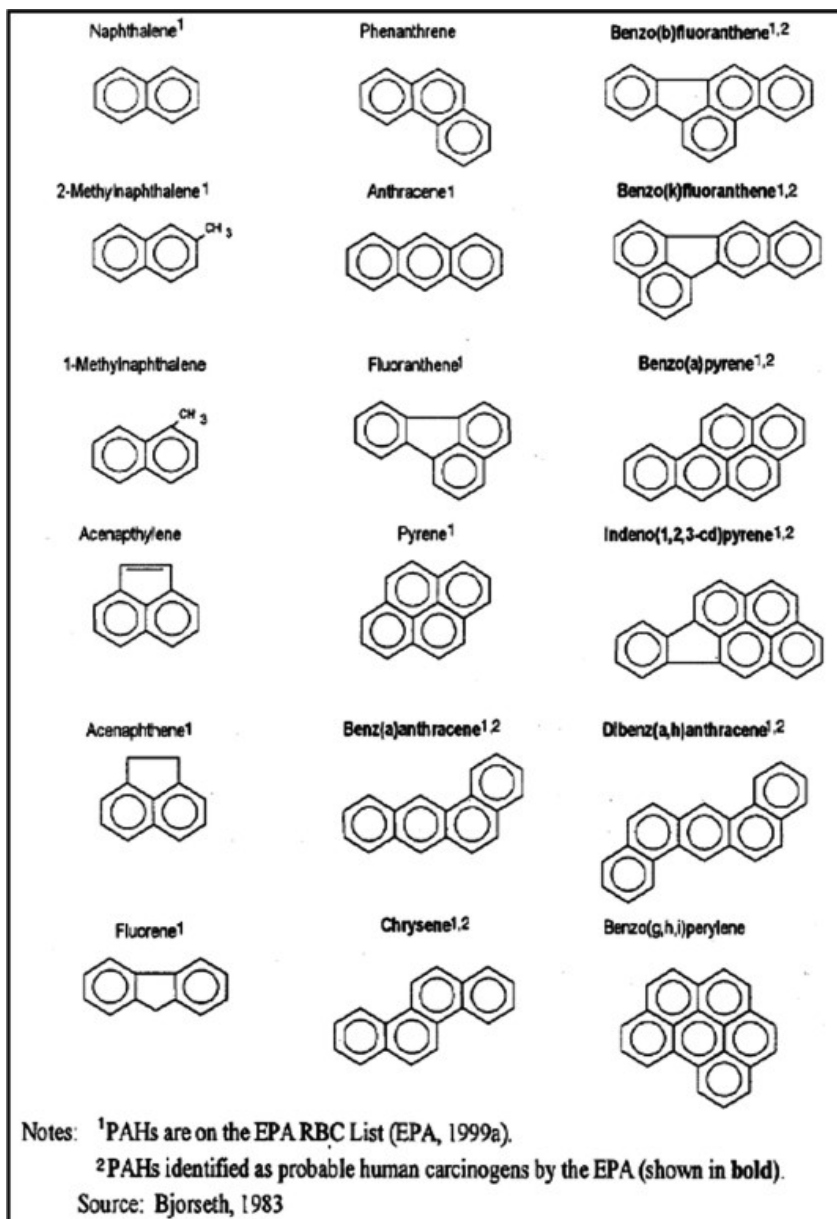
### 3.3 Efek Kesehatan dari Paparan PAH

Beberapa penelitian membuktikan bahwa PAH dapat menyebabkan efek karsinogenik dan mutagenik dan merupakan penekan kekebalan tubuh yang kuat. Efek yang telah didokumentasikan pada pengembangan sistem kekebalan tubuh, kekebalan humoral dan resistensi inang. Kadar PAH dalam darah dan urin dihasilkan dari campuran senyawa yang berasal dari berbagai sumber dan masuk ke dalam tubuh melalui berbagai rute. Namun, kadar metabolit urin dari beberapa PAH yang lebih mudah menguap (misalnya naftalena, fenantrena, dan pirena) sering digunakan sebagai pengganti untuk menilai paparan PAH melalui udara yang dihirup.

Sebagian besar studi epidemiologi yang meneliti hubungan antara kanker paru-paru dan PAH ambien bersifat pekerjaan. Nyatanya, hanya satu studi dari tahun 1983 menyelidiki hubungan antara kanker paru-paru dan paparan B[a]P ambien pada populasi umum. Dalam kebanyakan kasus, pekerja terpapar PAH dengan konsentrasi sangat tinggi (hingga  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), terutama melalui penghirupan. Satu meta-analisis termasuk dalam laporan monograf IARC mengungkapkan temuan dari penelitian yang menghubungkan kanker paru-paru dengan paparan terhadap PAH di tempat kerja. Studi-studi ini menunjukkan hubungan positif antara kanker paru-paru pada pekerja dan paparan PAH. Namun, hubungannya lemah (yaitu risiko relatif rendah), sehingga sulit untuk menghubungkan kanker paru-paru dengan paparan PAH. Selain itu, pekerja yang terpapar PAH juga

terpapar sejumlah besar senyawa karsinogenik atau berpotensi karsinogenik lainnya, seperti asbes, knalpot diesel, kromium, dan nikel.

Kanker payudara mungkin berhubungan dengan pajanan terhadap PAH sekitar dari berbagai sumber. Lima penelitian di Amerika Serikat meneliti hubungan antara kejadian kanker payudara dan jumlah semua PAH yang diukur (selanjutnya disebut PAH total) atau PAH individual di udara ambien. Penelitian menemukan hubungan positif yang signifikan antara PAH total atau individu dan kejadian kanker payudara di daerah yang sangat tercemar (perkotaan/industri). Cara kerja karsinogenik utama senyawa B[a]P adalah induksi yang menyebabkan kerusakan DNA, yang menyebabkan mutagenesis. Mayoritas PAH berkontribusi pada karsinogenesis melalui mode aksi non-genotoksik, termasuk peningkatan proliferasi sel dan peradangan, yang dapat mempotensiasi efek PAH genotoksik (WHO, 2021). Jenis-jenis senyawa PAH yang paling sering ditemui ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Jenis-jenis senyawa PAH (Abdel-Shafy & Mansour, 2016).

PAH paling sederhana, seperti yang didefinisikan oleh *International Agency for Research on Cancer*, adalah fenantrena dan antrasena, dimana keduanya mengandung tiga cincin aromatik yang menyatu. Di sisi lain, molekul yang lebih kecil, seperti benzena, bukanlah PAH. Naftalena, yang terdiri dari dua cincin beranggota enam coplanar yang berbagi tepi, adalah hidrokarbon aromatik lainnya. Oleh karena itu, ini bukan PAH yang sebenarnya, meskipun disebut sebagai hidrokarbon aromatik bisiklik. PAH yang paling banyak dipelajari adalah 7, 12-dimethylbenzo anthracene (DMBA) dan benzo(a)pyrene (BaP).

Sebuah studi *case-crossover* di India melaporkan kematian total, kardiovaskular, dan pernapasan serta rawat inap di rumah sakit meningkat 1,75 hingga 3,5 kali lipat selama hari kembang api (Beig et al., 2013). Mengenai PAH, bahkan paparan tingkat rendah dapat menyebabkan efek kesehatan kronis seperti kanker paru-paru, hasil kelahiran yang merugikan, dan kerusakan DNA (Kim et al., 2013a). Beberapa lembaga telah mengklasifikasikan PAH sebagai zat karsinogen (ATSDR, 2019). Studi epidemiologi telah mengaitkan paparan PAH setiap hari dengan demoralisasi ibu, penurunan kecerdasan, obesitas, dan asma pada anak-anak (Jia et al., 2020).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa paparan PAH dalam rahim mengganggu perkembangan kardiovaskular. Pada tikus, paparan B[a]P dalam rahim menyebabkan peningkatan tekanan darah sistolik secara signifikan pada keturunannya. Mekanisme potensial termasuk aktivasi AhR karena pensinyalan AhR endogen dianggap penting untuk pengembangan dan fungsi sistem kardiovaskular yang benar. Penurunan perilaku seperti kecemasan telah dilaporkan pada tikus dan mencit yang diuji dalam labirin plus yang ditinggikan setelah paparan postnatal (laktasi) terhadap B[a]P. Hasilnya menunjukkan bahwa efek lebih besar pada hewan yang lebih tua, yaitu ketika periode lebih lama antara paparan dan pengujian. PAH dapat diproduksi secara komersial termasuk naftalena, acenaphthene,



phenanthrene, fluoranthene, dan pyrene, namun, hanya naftalena yang langsung digunakan tanpa proses lebih lanjut,

Paparan PAH di tempat kerja dapat terjadi dari pekerja yang menghirup asap knalpot (seperti mekanik, pedagang kaki lima, atau pengemudi kendaraan bermotor) dan mereka yang terlibat dalam pertambangan, pengerjaan logam, atau penyulingan minyak. Rute paparan meliputi konsumsi, inhalasi, dan kontak kulit baik di tempat kerja maupun di luar tempat kerja. Beberapa paparan mungkin secara bersamaan melibatkan beberapa rute seperti paparan kulit dan inhalasi dari udara yang terkontaminasi, mempengaruhi dosis total penyerapan (Kim et al., 2013b; RAVINDRA et al., 2008).

### **3.4 Upaya Pencegahan Paparan PAH**

Konsentrasi PAH terukur di udara ambien dapat digunakan untuk mengevaluasi risiko paparan manusia. Namun, dalam banyak kasus, pengukuran ini dilakukan secara acak di sejumlah lokasi. Untuk studi regional, model dengan validasi yang memuaskan, lebih disukai untuk memperkirakan distribusi spasial konsentrasi PAH udara ambien untuk penilaian paparan populasi. Misalnya untuk memetakan konsentrasi PAH di permukaan tanah di Tianjin, Cina, dimana risiko paparan yang relatif tinggi ditemukan di antara penduduk perkotaan (Tao et al., 2006).

Meskipun total emisi PAH akan menurun di masa depan, emisi dari pembakaran biomassa di dalam ruangan di daerah pedesaan, yang menyumbang sebagian besar paparan PAH di China (48% pada tahun 2003), akan sedikit meningkat. Biomassa akan tetap menjadi sumber energi utama di pedesaan Cina selama bertahun-tahun yang akan datang. Namun, bagaimana biomassa dibakar akan membuat perbedaan besar pada emisi PAH. Dari tahun 1980 hingga pertengahan 1990-an, sebuah program dilakukan untuk mempromosikan tungku pembakaran biomassa yang lebih baik di pedesaan Cina (Tao et al., 2006; Zhang et al., 2009). Meskipun

tungku pembakaran batu bara tidak disorot dalam program dan pencapaian program tidak menjanjikan seperti yang direncanakan, potensi penghematan energi dan pengurangan emisi dengan menerapkan teknologi rendah yang sederhana, murah, praktis, tetapi efektif sangat baik telah didemonstrasikan

Penggunaan biomarker dalam mengukur *adduct* PAH-DNA telah diimplementasikan untuk menilai paparan untuk menghilangkan bias yang melekat dengan langkah-langkah pelaporan diri dalam studi kasus-kontrol yang telah menyelidiki hubungan antara PAH dan kanker. *Adduct* tampaknya berperan dalam perkembangan mutasi dan kanker, meskipun hubungan yang tepat tidak dipahami. Tingkat *adduct* mencerminkan dosis paparan serta bagaimana tubuh merespons paparan ini, yang sebagian disebabkan oleh variabilitas genetik (Korsh et al., 2015).

Komposisi PAH dari pembakaran (pirogenik) versus komposisi PAH dari penyulingan minyak bumi (petrogenik) bisa sangat berbeda. Sumber industri lain dengan emisi PAH yang signifikan adalah pabrik karbon hitam, pabrik pengawetan kayu (kreosot), industri aspal dan bitumen, produksi aluminium (elektroda Söderberg), produksi besi dan baja, pengecoran logam, produksi ban, pembangkit listrik, limbah insinerator, dan pembakaran jerami. Pembatasan lebih lanjut dapat menyebabkan emisi PAH yang lebih rendah dari industri ini.

### 3.5 Kesimpulan

PAH adalah sekelompok senyawa kimia yang dipancarkan dari pembakaran dan beberapa proses industri, dan sering dikaitkan dengan PM di udara ambien. Berbeda dengan PM ambien, PAH ditentukan secara kimiawi dan tidak dicirikan oleh sifat fisiknya saat pengambilan sampel. Jaringan pemantauan untuk PAH terutama melaporkan tingkat rata-rata tahunan. Penilaian pajanan PAH rumit dilakukan pada populasi umum karena kanker membutuhkan waktu lama untuk berkembang dan kondisi pajanan dapat berubah seiring waktu. Oleh karena itu, sulit untuk mendapatkan

data pajanan beresolusi tinggi untuk PAH tanpa menggunakan berbagai teknik pemodelan. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan penelitian lebih lanjut, terutama penelitian longitudinal dengan resolusi paparan temporal dan spasial yang tinggi yang mempertimbangkan potensi PAH yang berbeda dalam suatu campuran untuk berkontribusi pada perkembangan kanker. Penilaian terbaru berdasarkan data epidemiologis yang lebih canggih tentang hasil kanker pada populasi umum juga diperlukan. Dalam mengklasifikasikan polusi udara luar ruangan sebagai karsinogenik, IARC mendasarkan beberapa kesimpulannya pada studi epidemiologi kanker terkait paparan PM. Untuk polutan udara karsinogenik, termasuk beberapa PAH, paparan serendah mungkin harus ditujukan untuk meminimalkan risiko perkembangan kanker mengingat ambang batas yang terlihat tidak memiliki efek atau ciri yang jelas.

## Daftar Pustaka

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
- Akyüz, M., & Çabuk, H. (2010). Gas–particle partitioning and seasonal variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Zonguldak, Turkey. *Science of The Total Environment*, 408(22), 5550–5558. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.063>
- Armstrong, B., Hutchinson, E., Unwin, J., & Fletcher, T. (2004). Lung Cancer Risk after Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 112(9), 970–978. <https://doi.org/10.1289/ehp.6895>
- Beig, G., Chate, D. M., Ghude, S. D., Ali, K., Satpute, T., Sahu, S. K., Parkhi, N., & Trimbake, H. K. (2013). Evaluating population exposure to

- environmental pollutants during Deepavali fireworks displays using air quality measurements of the SAFAR network. *Chemosphere*, 92(1), 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.043>
- IARC MONOGRAPH. (2020). IARC Monographs on The Evaluation of Carcinogenic Risks To Humans. In *IARC* (Vol. 100).
- Jia, C., Xue, Z., Fu, X., Sultana, F., Smith, L. J., Zhang, Y., Li, Y., & Liu, B. (2020). Impacts of Independence Day fireworks on pollution levels of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the U.S. *Science of The Total Environment*, 743, 140774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140774>
- Kim, K.-H., Jahan, S. A., Kabir, E., & Brown, R. J. C. (2013a). A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*, 60, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.019>
- Kim, K.-H., Jahan, S. A., Kabir, E., & Brown, R. J. C. (2013b). A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*, 60, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.019>
- Korsh, J., Shen, A., Aliano, K., & Davenport, T. (2015). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Breast Cancer: A Review of the Literature. *Breast Care*, 10(5), 316–318. <https://doi.org/10.1159/000436956>
- Masih, J., Masih, A., Kulshrestha, A., Singhvi, R., & Taneja, A. (2010). Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor atmosphere in the North central part of India. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.017>
- RAVINDRA, K., SOKHI, R., & VANGRIEKEN, R. (2008). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission

- factors and regulation. *Atmospheric Environment*, 42(13), 2895–2921.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.010>
- Tao, S., Li, X., Yang, Y., Coveney, , Raymond M., Lu, X., Chen, H., & Shen, W. (2006). Dispersion Modeling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Combustion of Biomass and Fossil Fuels and Production of Coke in Tianjin, China. *Environmental Science & Technology*, 40(15), 4586–4591. <https://doi.org/10.1021/es060220y>
- WHO. (2000). *Guidelines for Air Quality*. WHO.
- WHO. (2021). *Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants - Report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution*. <https://www.who.int/europe/publications/item/9789289056533>
- Zhang, Y., Tao, S., Shen, H., & Ma, J. (2009). Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(50), 21063–21067. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905756106>

# BAB 4

## PENCEMARAN CHLORO FLUORO CARBONS DI UDARA DAN UPAYA PENANGGULANGANNYA

*Kalau kita selalu pusing memikirkan rejeki orang lain,  
maka rejeki kita sendiri akan sulit untuk kita diraih  
(Anwar Mallongi, 2022)*

### 4.1 Pendahuluan

CFC adalah bahan kimia buatan manusia yang digunakan secara umum dilemari es, styrofoam, dan aerosol. Chlorofluorocarbons (CFC) CFC-11 (CCl<sub>3</sub>F), CFC-12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) dan CFC-113 (CCl<sub>2</sub>F - CClF<sub>2</sub>) adalah bahan kimia senyawa yang telah diproduksi industri sejak tahun 1930-an. Sampai akhir 1980-an, konsentrasi atmosfer dari senyawa ini meningkat secara monoton. Dalam beberapa tahun terakhir, namun, konsentrasinya di atmosfer telah stabil atau menurun dengan adanya pemberlakuan dari protokol Montreal. Pada awalnya orang-orang berpikir bahwa CFC tidak berbahaya. Tapi itu mulai berubah pada tahun 1970 ketika James Lovelock, seorang peneliti medis, menyelidiki sumber kabut dekat rumahnya. Menggunakan instrumen yang dirancang sendiri, ia mendeteksi CFC dikabut, dan dengan terkejut, menemukan bahwa CFC berada di udara setiap harinya. Dia mengambil

instrumennya di perahu perjalanan ke Antartika dan terdeteksi CFC bahkan jauh di laut. Lovelock melaporkan penemuannya ke seluruh komunitas ilmiah (Undsci Team, 2007).

Selama beberapa dekade terakhir, perhatian telah difokuskan pada peran chlorofluorocarbons (CFC) pada penyebab penipisan ozon stratosfir (Rowland, 1990). Yang mengandung karbon, fluorin, dan atom klorin, pertama kali disintesis pada tahun 1920. Mereka secara luas digunakan sebagai fluida kerja dalam refrigerasi kompresi, seperti yang biasa ditemukan dalam AC dan kulkas makanan. Mereka juga digunakan untuk memproduksi bahan plastik seperti styrofoam, dimasukkan sebagai bahan pembakar dalam semprotan aerosol, dan digunakan sebagai pelarut industri.

Molina dan Rowland (1974) awalnya mengajukan teori bahwa CFC dapat menyebabkan penipisan ozon stratosfer. Penyelidikan eksperimental berikutnya telah membuktikan hal tersebut. Di Antartika, kerusakan ozon telah diamati selama beberapa tahun berturut-turut. Meskipun masih sedikit namun penipisan ozon terdeteksi telah terdeteksi di atas pertengahan garis lintang di belahan bumi utara. Perkiraan kontribusi CFC untuk pemanasan global adalah sekitar 17% pada tahun 1980 (Toiba et al., 1992). Bahan kimia yang diidentifikasi dapat menyebabkan kerusakan lapisan ozon adalah senyawa kimia yang mengandung atom chlorine dan bromine. Salah satu senyawa kimia yang mengandung atom chlorine tersebut adalah CFC (Chlorofluorocarbon) yang merupakan salah satu gas rumah kaca. Gas rumah kaca inilah yang nantinya menyebabkan radiasi matahari terperangkap di atmosfer bumi. Hal ini berlangsung berulang kali, lalu terjadilah akumulasi radiasi matahari di atmosfer bumi yang menyebabkan suhu di bumi menjadi semakin hangat

## 1.2 Karakteristik Cloro Fluoro Carbon (CFC)

Bahan kimia klorofluorokarbon (CFC) atau yang populer disebut Freon yang telah dikembangkan sejak penemuannya di tahun 1930. CFC

ini sangat stabil, tidak berbau, tidak mudah, terbakar, tidak beracun, dan tidak korosif, dengan demikian sangat baik digunakan untuk pendingin ruangan dan refrigerator (kulkas). Bahan kimia ini juga dipergunakan untuk sterilisasi sebagai aerosol di rumah sakit, untuk membuat busa plastik sebagai penyekat, dan sebagainya. Sejak selesai perang dunia kedua (1945), penggunaan beberapa jenis CFC dipakai secara luas, sehingga CFC diproduksi besar-besaran di Amerika Serikat.

Penggunaan bahan kimia CFC yang sangat menguntungkan tersebut secara besar-besaran mengakibatkan CFC bocor ke udara sangat mungkin terjadi, misalnya penyemprotan ruangan, kebocoran kulkas, dan *air conditioner*, serta pembakaran busa plastic. Hal ini mengakibatkan CFC akan terbebas ke udara dan bergerak ke lapisan stratosfer. Dalam lapisan stratosfer di bawah pengaruh radiasi sinar ultraviolet berenergi tinggi, bahan tersebut terurai dan membebaskan atom klor. Klor akan mempercepat pemecahan ozon menjadi gas oksigen (O<sub>2</sub>). Diperkirakan satu atom klor akan dapat mengurai 100.000 molekul O<sub>3</sub>. Disamping itu, gas dari rumah kaca dan beberapa atom lainnya seperti bahan yang mengandung bromium (Br), yang disebut halon juga ikut memperbesar pemecahan ozon tersebut (Darmono, 2001).

Oleh karena mereka pentingnya masalah ozon stratosfir, maka dibuatlah peraturan dan, dengan tujuan agar emisi akan berkurang dengan cepat. Protokol Montreal tahun 1987 tentang bahan yang merusak lapisan ozon, misalnya, memerlukan pengurangan 20 persen emisi CFC di bawah level 1986 hingga 1994, dan penurunan total 50 persen pada 1998. Beberapa gas khusus tercantum dalam Protokol adalah CFC -11, CFC-12, CFC-13, CFC-114 dan CFC-115 (D.V.Satyanarayana, 2012). Perkiraan konsentrasi dari Emisi CFC (CFC-12) di atmosfer dari tahun ke tahun mengalami peningkatan. Hal ini dapat terlihat :



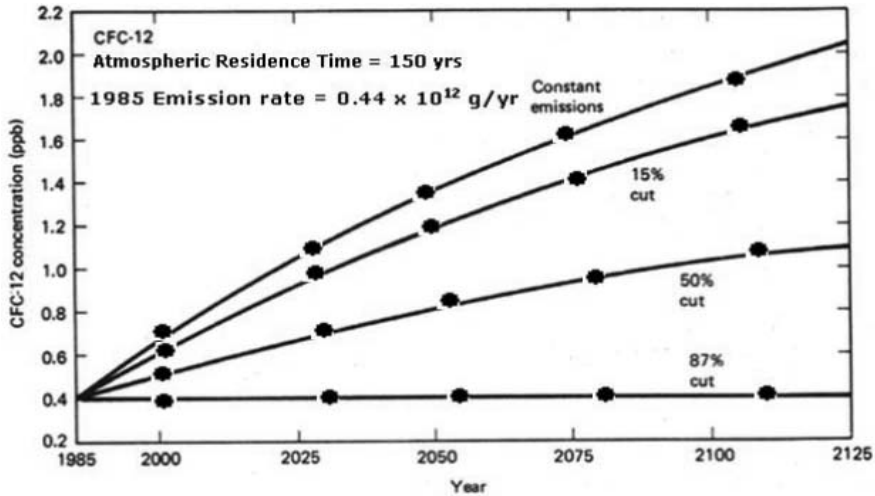


Fig: 1 CFC-12 Emission rates and Atmospheric Concentrations Rise

**Gambar 4.1** Tingkat Emisi CFC – 12 and Kenaikan Atmosphere

Ketika tahun 1976 pembuatan CFC untuk aerosol sudah mencapai 55 persen, sedangkan sebagai bahan pendingin, pengembang dan pembersih masing-masing-masing 20 persen, 15 persen, dan 10 persen. Namun menurut data tahun 1984 meskipun aerosol telah turun menjadi 25 persen, pembuatan bahan pendingin, pengembang dan pembersih sudah meningkat menjadi 30 persen, 25 persen, dan 20 persen.

Penggunaan CFC paling tidak sudah dimulai oleh General Motor yang mengembangkannya pada tahun 1930-an sebagai pengganti bahan pendingin metil khlorida dan sulfur dioksida yang digunakan pada waktu itu. Penggunaan CFC terus berkembang hingga waktu belakangan ini karena keunggulannya, yaitu tidak beracun, tidak bisa terbakar, tidak korosif, dan merupakan senyawa yang sangat stabil. Jika pada tahun 1931 produksi CFC baru sekitar 500 ton, tahun 1987 sudah menjadi satu juta ton. Namun demikian bahaya penggunaan CFC bagi lingkungan baru diketahui tahun 1974 oleh ilmuwan dari Universitas California dan Michigan AS dengan hipotesanya tentang teori penipisan lapisan ozon. Menurut mereka, CFC di lapisan stratosfer akan melepaskan khlorine karena terkena sinar ultra ungu.

Khlorine selanjutnya bereaksi dengan ozon membentuk khlorin monoksida (ClO) dan oksigen, namun ClO akan terurai lagi melepaskan khlorine. Selanjutnya proses penguraian ozon terjadi berulang sampai lebih dari 10 ribu kali. Menurut penelitian, sejak produksi CFC telah terjadi peningkatan emisi CFC ke atmosfer dan terdapat 100 ton pada tahun 1931 menjadi 650 ton tahun 1985, dengan laju kenaikan lima persen per tahun (Tresna, 2009).

### **4.3 Sumber – sumber CFC**

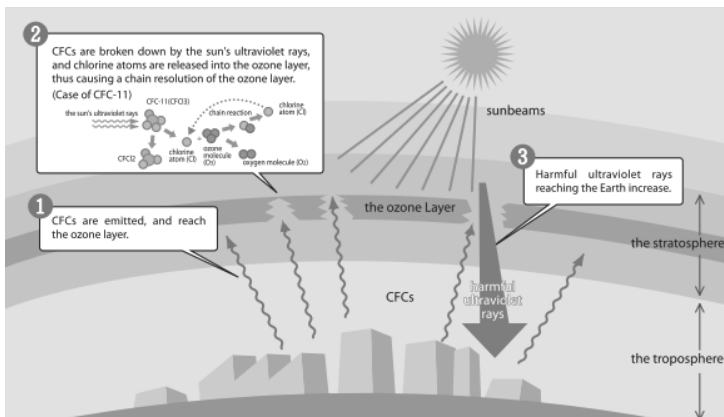
Sumber utama dari CFC adalah berasal dari kegiatan manusia yang berperan dalam penipisan lapisan ozon. Industri banyak mengemisikan CFC dari limbah pabrik berupa gas dari pabrik, refrigotor, AC (Air Conditioner), dan aerosol. CFC-11, CFC-12 dan CFC-114 secara luas juga digunakan pada produk dengan alat kerja penyemprot atau disebut aerosol spray seperti kaleng semprot untuk pengharum ruangan, penyemprot rambut (hair spray), minyak wangi/parfum, insektisida, pembersih kaca (jendela), pembersih oven, produk-produk farmasi, cat, minyak pelumas dan oli. CFC yang berlebihan dikonsumsi oleh masyarakat modern dunia sejak berpuluh-puluh tahun yang lalu. CFC dapat melepaskan atom Chlorine dan dapat merusak lapisan ozon. CFC digunakan oleh masyarakat di dunia dengan cara yang tidak terduga banyaknya, misalnya dengan penggunaan Freon pada alat AC, lemari es, dan alat pendingin lainnya merupakan salah satu bentuk yang turut andil dalam pengrusakan lapisan ozon, karena alat ini menggunakan CFC-11, CFC-12, CFC 114 dan HCFC-22 dalam proses kerjanya (Mashitah, 2013).

### **4.4. Keberadaan CFC di udara**

Pemakaian CFC secara berlebihan dan berkelanjutan dalam berbagai penggunaannya seperti bahan pendingin pada AC, dry clean, pada industry elektronik makin menambah kadar pencemaran udara yang pada akhirnya menimbun di lapisan atmosfer bumi. Pada Protokol Montreal 1987 yang

dihadiri oleh 50 negara dan Vienna Convention 1988 yang menetapkan pengurangan bertahap produksi CFC berdasarkan produksi 1986, yaitu sebesar 20% tahun 1993 dan meningkat menjadi 50 persen tahun 1998, menurut protokol Montreal pembatasan dikenakan pada beberapa mesin pendingin yang menggunakan CFC 11, 12, 113, 114 dan CFC 115., diantara semua CFC tersebut CFC 11 yang mempunyai daya rusak terbesar karena persentase khlorinnya terbesar.

Penyelidikan bahkan membuktikan CFC juga menyumbang 15 % terjadinya Efek Rumah Kaca yang berakibat kenaikan suhu bumi atmosfer. Bahaya penggunaan CFC bagi lingkungan baru diketahui tahun 1974 dengan hipotesa penipisan lapisan ozon, CFC di lapisan stratosfer akan melepaskan khlorine karena terkena sinar matahari. Khlorine selanjutnya bereaksi dengan ozon membentuk khlorine monoksida (CLO) dan oksigen, namun CLO akan terurai lagi melepaskan khlorine, selanjutnya proses penguraian ozon ini terjadi berulang sampai lebih 10.000 kali. Menurut penelitian, sejak diproduksi CFC telah terjadi peningkatan emisi CFC ke atmosfer dari 100 ton pada tahun 1931 menjadi 650 ton tahun 1985, yaitu dengan laju kenaikan lima persen setahun.



**Gambar 4.2** Mekanisme Pemanasan Global Akibat Tiga CFC

Dari gambar diatas dapat diketahui Mekanisme Pemanasan Global Akibat Tiga CFC Alternatif Padat gas efek rumah kaca termasuk tiga alternatif CFC memiliki dampak yang signifikan terhadap pemanasan global.

Pelepasan CFC dari permukaan Bumi ke atmosfer kemudian CFC menuju ke lapisan ozon, bahan CFC tersebut kemudian di atmosfer melepaskan klorin (Cl), dan bereaksi dengan ozon. Satu atom klorin tersebut dapat memisahkan ribuan molekul ozon, sehingga lapisan ozon mengalami penipisan. Penipisan ozon ini berdampak dengan meningkatnya radiasi UV yang sampai di permukaan bumi. Dan kemudian menimbulkan dampak kesehatan dan dampak lingkungan (Eko Cahyono, 2010).

#### 4.5 Kegunaan dan Manfaat CFC

Pemakaian CFC banyak digunakan sebagai bahan pendingin pada mesin penyejuk ruangan (AC), sebagai bahan pengembang pada pembuatan karet dan plastic busa sebagai isolator (CFC-11), serta sebagai bahan pembersih pada industri elektronik (CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114 dan CFC-115). Diantara jenis CFC tersebut, yang mempunyai daya perusak terbesar yaitu CFC-11, yang mempunyai persentase khlorin terbesar (Sastrawijaya, T, 2009).

Pada kehidupan sehari-hari penggunaan CFC-11, CFC-12 dan CFC-114 secara luas juga digunakan pada produk dengan alat kerja penyemprot atau disebut aerosol spray seperti kaleng semprot untuk pengharum ruangan, penyemprot rambut (hair spray), minyak wangi/parfum, insektisida, pembersih kaca (jendela), pembersih oven, produk-produk farmasi, cat, minyak pelumas dan oli. Penggunaan CFC-113 sebagai cairan pembersih (*cleaning solvent*) pada proses pembuatan peralatan elektronik, penghilangan lemak (*degreasing*) logam selama proses fabrikasi. Selain itu CFC-113 digunakan untuk *dry-cleaning* dan *spot-cleaning* pada industri tekstil (Mashitah, 2013).

## 4.6 Dampak Lingkungan Pencemaran CFC

Para ilmuwan setuju bahwa emisi buatan manusia chloro fluoro carbons (CFC), Halons, karbon tetraklorida, metil kloroform, metil bromida dan zat lain yang bertanggung jawab atas penipisan lapisan ozon. Jutaan molekul ozon dihancurkan setiap menit dan ini meningkatkan jumlah radiasi ultraviolet yang berbahaya yang mencapai permukaan bumi. Orang, hewan dan tumbuhan yang terkena radiasi ini, yang mengancam untuk menyebabkan kanker kulit dan katarak mata, dan penekanan sistem respon imun mengurangi produktivitas pertanian dan sangat merusak rantai makanan laut. CFC juga calon potensial untuk pemanasan global (D.V.Satyanarayana M et al,2012).

Menurut penelitian baru dari University of Waterloo diterbitkan dalam International Journal of Modern Physics B bahwa Chlorofluorocarbons (CFC) yang merupakan yang berpengaruh lebih atas pemanasan global sejak 1970-an dan bukan merupakan karbon dioksida. Menurut penelitian tersebut CFC sudah diketahui menipiskan ozon, dan analisis statistik mendalam sekarang menunjukkan bahwa CFC juga merupakan pendorong utama dalam perubahan iklim global, daripada karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) (Qing-Bin Lu, 2013).

Gas CFC yang menyebabkan menipisnya lapisan ozon pada atmosfer bumi, menyebabkan konsekuensi sebagai berikut:

1. Terjadinya perubahan iklim global, karena sinar matahari yang masuk ke bumi secara langsung sampai ke bumi tanpa melalui proses pemantulan (refleksi) dan penyerapan (absorpsi). Hal ini mengakibatkan suhu udara dipermukaan bumi akan lebih cepat panas dan pada akhirnya mengakibatkan secara global terjadinya perubahan iklim di bumi.
2. Berpotensi untuk membahayakan kelangsungan makhluk hidup di bumi, oleh karena radiasi sinar matahari terutama sinar ultraviolet yang sampai ke permukaan bumi memiliki jumlah yang sangat

berlebihan. Hal ini berakibat dengan munculnya penyakit kanker kulit, katarak, proses penuaan, kulit menjadi lebih cepat, dan menyebabkan menurunnya sistem kekebalan tubuh. Adanya radiasi sinar ultraviolet yang berlebihan dapat pula mengakibatkan terganggunya fotosintesis pada tumbuhan di darat maupun di laut sehingga rantai makanan menjadi terganggu dan mengalami ketidak seimbangan.

#### 4.7 Dampak Kesehatan Pencemaran CFC

Efek kesehatan dari tiga CFC yang umum diteliti adalah triklorofluorometana (CFC11), dichlorodifluoromethane (CFC12), dan trichlorotrifluoroethane (CFC 13). Efek kesehatan CFC lain, pada umumnya, cenderung sama (EFC, 2010). Berikut beberapa dampak kesehatan dari pencemaran CFC yaitu:

1. Penyerapan/Metabolisme

CFC terutama diserap jika terhirup, dan pada tingkat lebih rendah melalui konsumsi dan melalui kulit. CFC yang lebih cenderung disimpan dalam jaringan lemak. CFC Hampir semua diserap dibersihkan dari tubuh dalam waktu 24 jam.

2. Efek Jangka pendek (akut)

Paparan CFC bertekanan, seperti dapat terjadi dengan kebocoran zat pendingin, dapat menyebabkan radang dingin pada kulit serta saluran napas bagian atas bila terhirup. CFC terkena suhu tinggi dapat mengurai ke lebih gas beracun akut seperti klorin dan fosgen.

Menghirup CFC pada konsentrasi tinggi mempengaruhi sistem saraf pusat (SSP) dengan gejala minuman keras seperti keracunan, mengurangi koordinasi, pusing ringan, sakit kepala, tremor, dan kejang-kejang. Konsentrasi yang sangat tinggi dapat menyebabkan gangguan irama jantung. Menghirup secara sengaja uap telah menyebabkan beberapa kematian, mungkin dari gangguan irama jantung.

Dalam sebuah studi inhalasi akut, manusia yang terpapar selama beberapa jam untuk meningkatkan konsentrasi CFC. Saat konsentrasi CFC meningkat, dampak kesehatan juga meningkat.

### 3. Efek Jangka Panjang (kronis)

Dalam studi kerja, pekerja yang terpapar CFC pada standar kerja tidak menunjukkan efek kesehatan yang merugikan. Dalam sebuah studi dari hewan laboratorium terkena secara oral dengan CFC11, kematian berkerut diamati. Kelinci percobaan terkena CFC12 terhirup memiliki efek ke hati. Spesies lain laboratorium hewan terkena dalam kondisi yang sama tidak menunjukkan efek yang merugikan kesehatan.

### 4. Efek Karsinogenik (kemampuan menyebabkan kanker)

Penelitian yang melibatkan spesies binatang yang berbeda terkena CFC tidak menunjukkan bukti karsinogenik (kanker) efek. Meskipun U. S. Environmental Protection Agency (EPA) belum dievaluasi secara resmi CFC untuk potensi karsinogenik mereka, studi yang tersedia hasil tampaknya menunjukkan bahwa potensi mereka untuk menyebabkan kanker rendah

## 4.8 Upaya-upaya Penurunan CFC Menuju Green City

Untuk mengurangi dampak dari penggunaan CFC, maka rencana pengurangan ini memberi dampak yang besar terhadap bidang teknik pendingin maupun industri seperti pabrik busa poliuretan, aerosol, dan bahan-bahan pembersih elektronik yang menggunakan tersebut. Antara lain telah mendorong pabrik pembuat mesin pendingin berlomba menemukan bahan pengganti, yaitu memakai jenis CFC yang tidak terkena pembatasan.

Untuk pendingin dan AC, alternative pengganti CFC-12 adalah HFC 134a, dan pengganti CFC-11 adalah HCFC-123. Keduanya saat ini masih

dalam taraf pengujian terhadap daya racun dan keandalannya dari segi keamanan, dan teknis.HCFC-123 selain mempunyai masalah pada material pengikat, juga mempunyai efek mematikan rasa atau membius. Selain dari kedua jenis bahan pendingin pengganti, saat ini banyak dipakai HCFC-22 yang belum terkena pembatasan pemakaian CFC-11 dan CFC-12 pada mesin pendingin (Sastrawijaya, T , 2009).

Karena penyebab utama rusaknya lapisan ozon adalah klorofluorokarbon (CFC), maka perlu dilakukan pembatasan penggunaan CFC dalam kehidupan sehari-hari, yaitu sebagai berikut:

1. Penghentian penggunaan CFC dalam penyemprotan aerosol dan untuk pendingin ruangan
2. Penghentian produksi busa plastic yang menggunakan CFC dan perlu diganti dengan bahan lain.
3. Bengkel mobil untuk pengisian Freon harus dapat mendaur ulang Freon dari mobil yang ber-AC.
4. Mobil yang menggunakan Freon untuk AC yang mudah bocor harus diganti atau dihentikan.
5. Langkah berikutnya ialah menghentikan semua penggunaan CFC, halon, metil kloroform dan karbon tetraklorid

Dengan penggantian bahan pendingin untuk AC dan refrigerator akan memerlukan biaya tinggi, akan tetapi bila dibandingkan antara kepentingan ekonomi dengan gangguan kesehatan karena berkurangnya lapisan ozon adalah sangat kecil. Pada tahun 1989 dilakukan suatu konferensi internasional di Helsinki dengan delegasi 81 negara setuju secara aklamasi menghentikan penggunaan dan memproduksi CFC sampai tahun 2000. Termasuk penggunaan bahan lain yang dapat mengurangi ozon seperti halon, karbon tetraklorid, dan metil kloroform harus dikurangi. Walaupun produksi dan penggunaan semua CFC serta bahan lain tersebut segera dihentikan, namun akan diperlukan waktu lebih dari 100 tahun untuk memulihkan kondisi



ozon seperti semula. Hal ini disebabkan karena telah banyaknya timbunan bahan perusak ozon dalam atmosfer ( Darmono, 2001).

Bahan kimia yang saat sekarang ini dipakai untuk mengganti CFC adalah HCFC (hydro-chlorofluorocarbons) dan HFC (hydrofluorocarbons seperti R-134a). HFC merupakan jenis refrigerant yang lebih aman karena tidak mempunyai unsur khlor. Oleh sebab itu tidak merusak lapisan ozon dan nilai ODP (Ozone Depleting Potential, yakni potensi suatu bahan merusak lapisan ozon) sama dengan nol. Untuk pendingin AC, alternatif pengganti CFC 12 adalah HFC 134a (Hidro-khloro-floro-carbon) dan CFC 11 dengan HCFC-123. Saat ini kedua senyawa tersebut dalam taraf pengujian terhadap daya racun dan keandalannya dari segi keamanan dan teknis. HCFC merupakan golongan faktor penipisan ozon (ODF) yang relatif lebih rendah dibanding dengan CFC berkisar antara CFC 11 dan 12 memiliki ODF 1. HCFC mempunyai ODF rendah karena satu atom klorin diganti dengan hidrogen, sehingga total berat relatif khlor berkurang. HCFC bersifat tidak stabil sehingga sebelum sampai ke lapisan ozon telah terurai lebih dahulu (Nurmaini, 2001).

Untuk mengatasi penipisan lapisan ozon berbagai Negara telah melakukan kesepakatan untuk melakukan eliminasi terhadap bahan-bahan yang menimbulkan kerusakan lapisan ozon tersebut. Salah satu upaya tersebut antara lain dengan mengganti bahan tersebut dengan bahan yang lebih aman bagi ozon. CFC berjenis CFC-12 merupakan bahan yang banyak dipakai di seluruh permukaan bumi, yang diperkirakan 63,4 % (Eko Cahyono, 2010).

Penggunaan Hidrofluorokarbon (HFC) untuk mengganti CFC dan HCFC yang memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah, namun masih diragukan apakah solusi ini cukup ramah lingkungan. Dimana diketahui bahwa HFC memiliki dampak potensial untuk pemanasan global yang relative tinggi, seperti adanya peraturan yang diatur dinegara-negara di Eropa pada awal dekade ini. Namun demikian Amerika menganggap penggunaan HFC untuk mengganti CFC adalah cukup aman karena secara

keseluruhan hanya memiliki kontribusi yang kecil terhadap pemanasan global jika dibandingkan dengan karbondioksida, yang merupakan gas utama penyebab gas rumah kaca. Amerika menunjukkan bahwa bahkan kontribusi kecil ini dapat dikontrol dengan mengurangi kebocoran lebih lanjut refrigerante, sehingga HFC, sehingga dapat membawa manfaat seperti tidak mudah terbakar, dengan demikian penggunaan HFC tidak perlu ditinggalkan (Heaton, Alan et al, 2006).

## Daftar Pustaka

- Darmono. 2001. *Lingkungan Hidup dan Pencemaran: Hubungannya Dengan Toksikologi Senyawa logam/Darmono*. Jakarta: Universitas Indonesia
- D.V.Satyanarayana Moorthy, Dr. B. Kotaiah. 2012. *Impact of CFC on Ozone Layer and Global Warming*. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) Vol. 2 Issue 1, Jan.2012, pp. 059-069. [http://www.iosrjen.org/Papers/vol2\\_issue1/L021059069.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol2_issue1/L021059069.pdf). Diakses tanggal 17 Desember 2014 pukul 06.35 WITA
- Eko Cahyono, Waluyo. 2010. *Urgensi Menjaga Lapisan Ozon Bagi Penghuni Bumi*. Penelitian Bidang Pengkajian Ozon dan Polusi Udara, LAPAN
- Environmental Fact Sheet. 2010. *Chlorofluorocarbons (CFCs): Health Information Summary*. New Hampshire Department of Environmental Services.
- Heaton, Alan et al. 2006. *The challenge to develop CFC (chlorofluorocarbon) replacements: a problem based learning case study in green chemistry*. Chemistry Education e search and Practice, 2006, 7 (4), 280-287. [http://www.rsc.org/images/Heaton%20paper\\_tcm18-66595.pdf](http://www.rsc.org/images/Heaton%20paper_tcm18-66595.pdf). Diakses tanggal 17 Desember 2014 pukul 06.35 WITA

- Horneman, A, et al. 2008. *Degradation rates of CFC-11, CFC-12 and CFC-113 in anoxic shallow aquifers of Araihasar, Bangladesh*. *Journal of Contaminant Hydrology* 97 (2008) 27 – 41.  
[http://www.ldeo.columbia.edu/~avangeen/publications/documents/Horneman\\_JContHydr\\_08.pdf](http://www.ldeo.columbia.edu/~avangeen/publications/documents/Horneman_JContHydr_08.pdf). Diakses tanggal 17 Desember 2014 pukul 06.15 WITA
- Mallongi A, Natsir MF, Dwi R, Astuti P, Rauf AU, Rachmat M, Muhith A. 2020. Potential ecological risks of mercury contamination along communities area in tonasa cement industry Pangkep, Indonesia?. *Enferm Clin*. 30:119–122.
- Mallongi, A.; Stang S.; Astuti, R.D.P.; Rauf, A.U.; Natsir M.F., (2023). Risk assessment of fine particulate matter exposure attributed to the presence of the cement industry. *Global J. Environ. Sci.Manage.*, 9(1): 1-16.
- M. Peter Haas. 1992. *Banning Chlorofluorocarbons: Epistemic Community Efforts to Protect Stratospheric Ozone*. International Organization, Volume 46, Issue 1, Knowledge, Power, and International Policy Coordination 187-224
- Masithah, Itha. 2013. *Jurnal Menipisnya Lapisan Ozon*. <http://ithamasithah25.files.wordpress.com/2013/05/jurnal-menipisnya-lapisan-ozon-pengkomp-e1a012016.pdf>. Diakses tanggal 17 Desember 2014 pukul 06.20 WITA
- Molina, M.J. and Rowland, F.S. 1974 Stratospheric sink for chlorofluoromethanes. Chlorine-atom catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-812.
- Nurmaini. 2001. *Peningkatan Zat-Zat Pencemar Mengakibatkan Pemanasan Global*. USU digital library

- Qing-Bin Lu. 2013. *Global warming caused by chlorofluorocarbons, not carbon dioxide*. University of Waterloo
- Rauf, A.U.; Mallongi, A.; Lee, K.; Daud, A.; Hatta, M.; Al Madhoun, W.; Astuti, R.D.P. Potentially Toxic Element Levels in Atmospheric Particulates and Health Risk Estimation around Industrial Areas of Maros, Indonesia. *Toxics* 2021, 9, 328. <https://doi.org/10.3390/toxics9120328>
- Toiba, M.K., O.A.El-kholy, E.El-Hinnawi, M.W. Holdgate, D.F. McMichael, and R.E. Munn, eds. 1992. *The world Environment 1972-1992*, London: Chapman & Hall.
- Sastrawijaya, T, A. 2009. *Pencemaran Lingkungan*. Cetakan Kedua. Jakarta: Rineka Cipta
- Undsci Team. 2007. *Ozone depletion: Uncovering the hidden hazards of hairspray*. The University of California Museum of Paleontology, Berkeley, and the Regents of the University of California [http://undsci.berkeley.edu/lessons/pdfs/ozone\\_depletion\\_complex.pdf](http://undsci.berkeley.edu/lessons/pdfs/ozone_depletion_complex.pdf). Diakses tanggal 14 Desember 2014 pukul 19.29 WITA



# BAB 5

## PENCEMARAN OZON DI UDARA DAN UPAYA PENANGGULANGANNYA

*Bicara, rencana, koreksi dan ide itu mudah, tapi  
mengimplementasikan adalah sukar  
(Anwar Mallongi, 2022)*

### 5.1 Pendahuluan

Hubungan antar manusia timbal balik antar manusia dan lingkungan dititikberatkan pada interaksi-interaksi yang pada akhirnya memengaruhi kehidupan manusia. Atmosfer dan pemanasan global merupakan tanggung jawab global bila manusia melakukan bebrbagai macam kegiatan di lingkungan baik kegiatan kecil maupun besar seperti kegiatan industri dan yang lainnya. Kegiatan ini dapat serentak menimbulkan perubahan-perubahan global yang sulit untuk diprediksi. Berbagai aktivitas manusia yang dilakukan dari dulu sampai sekarang memengaruhi kondisi kehidupan generasi mendatang. Memahami bahwa kegiatan manusia menghasilkan dampak negative dengan masa penundaan sekian lama, membuat kita merasa bertanggung jawab sebab tidak lagi mungkin menghentikan kegiatan

yang lalu. Bahkan kita harus menerima dampak yang terjadi dari kegiatan tersebut. Salah satu contohnya adalah menipisnya lapisan ozon ( $O_3$ ).

Ozon adalah gas yang terdiri dari molekul yang memiliki tiga atom Oksigen. Lapisan ozon berada pada atmosfer yang lapisan pertama yaitu troposfer, 0-20 km diatas permukaan laut dan pada lapisan kedua yaitu lapisan stratosfer, 20-45 km. Lapisan ini dapat menyerap radiasi ultra violet yang dipancarkan matahari. Pada lapisan ini ozon terbentuk dan terurai melalui keseimbangan dinamis. Keberadaan bahan-bahan kimia tertentu di stratosfir dapat mengganggu keseimbangan reaksi tersebut, sehingga semakin lama molekul ozon semakin berkurang, dan menimbulkan lubang ozon (Moestikahadi, 2001). Penyebab utama lubang ozon adalah Chloro-Fluoro-Carbon (CFC). Selama beberapa dekade terakhir, CFC yang dilepaskan ke atmosfer mencapai jumlah yang cukup besar. Jika tidak di cegah, dikhawatirkan akan menghancurkan lapisan ozon. Estimasi CFC pada tahun 1990, jumlah yang di produksi naik menjadi 67.000 ribu ton bersama-sama dengan karbon tetrakhlorida dan metilkloroform, zat ini menambah jumlah organoklorin di atmosfer dari 0,7 ppb. Unsur aktif yang mengurangi lapisan ozon adalah atom khlorin yang berasal dari penguraian CFC yang menyerap UV berenergi tinggi (Wardhana, 2009).

CFC berasal dari senyawa-seyawa yang digunakan pada pendingin AC, lemari es dan juga digunakan pada bahan penyemprot hama seperti insektisida, penyemprot cat, penyemprot rambut, penyemprot farfum, serta pada pelarut bahan pencuci kering. Kerusakan lapisan ozon pada saat ini sudah terlihat di atas kutub selatan, berupa lubang ozon atau *Ozone Hole*. Apabila kerusakan ini tidak dicegah, lubang ozon akan semakin melebar, tidak tertutup. Terjadinya peningkatan suhu di bumi, terutama di Indonesia mulai meningkat akibat dari berbagai kegiatan manusia. Hal ini menandakan bahwa lubang ozon sudah mulai melebar atau rusak. Salah satu cara untuk mengatasi kerusakan ozon terutama daerah perkotaan adalah dengan Green City yang merupakan salah satu konsep pendekatan perencanaan kota yang berkelanjutan. Green City juga dikenal sebagai Kota Ekologis

atau kota yang sehat. Artinya adanya keseimbangan antara pembangunan dan perkembangan kota dengan kelestarian lingkungan. Dengan kota yang sehat dapat mewujudkan suatu kondisi kota yang aman, nyaman, bersih, dan sehat untuk dihuni penduduknya. Untuk dapat mewujudkannya, diperlukan usaha dari setiap individu anggota masyarakat dan semua pihak terkait.

## 5.2 Karakteristik Ozon (O<sub>3</sub>)

Ozone, berasal dari kata kerja bahasa Yunani yang artinya “mencium”, merupakan suatu bentuk oksigen alotropis (gabungan beberapa unsur) yang setiap molekulnya memiliki tiga jenis atom. Formula ozon adalah O<sub>3</sub>, berwarna biru pucat dan merupakan gas yang sangat beracun dan mempunyai bau sangat tajam. Ozon mendidih pada suhu -111,9° C, mencair pada suhu -192,5° C, dan memiliki gravitasi sebanyak 2144. Ozon cair berwarna biru gelap, dan merupakan cairan magnetis kuat. Ozon terbentuk ketika ada percikan listrik dalam oksigen. Bau ozon dapat diketahui atau dideteksi melalui bau yang ditimbulkan oleh mesin-mesin bertenaga listrik (KLH, 2004).

Secara kimiawi, ozon lebih aktif daripada oksigen biasa dan juga merupakan agen oksidasi yang baik. O<sub>3</sub> memiliki karakteristik berbau tajam, merupakan gas yang beracun. Ozon adalah zat pengoksidasi yang kuat dibandingkan dengan O<sub>2</sub> dan bereaksi dengan banyak senyawa dalam kondisi di mana O<sub>2</sub> tidak dapat melakukannya. Reaksi;



Ozon digunakan untuk oksidasi senyawa organik dan dalam pemurnian air. Mekanisme oksidasi mungkin melibatkan proses rantai radikal bebas demikian juga intermediet dengan gugus -OOH. Dalam larutan asam O<sub>3</sub> hanya diungguli dalam kekuatan oksidasinya oleh F<sub>2</sub>,



ion perxentat, atom oksigen, radikal OH, dan sejumlah kecil spesies yang lainnya (Soemirat, 2011).

### 5.3 Sumber-Sumber Pencemar Ozon (O<sub>3</sub>)

#### 1. Sumber Alamiah

Secara alamiah ozon dapat terbentuk melalui radiasi sinar ultraviolet pancaran sinar Matahari. Di mana ia menjelaskan bahwa sinar ultraviolet dari pancaran sinar Matahari mampu menguraikan gas oksigen di udara bebas. Molekul oksigen tadi terurai menjadi dua buah atom oksigen, proses ini kemudian dikenal dengan nama photolysis (Greenberg, dkk.1998). Lalu atom oksigen tadi secara alamiah bertumbukan dengan molekul gas oksigen yang ada disekitarnya, lalu terbentuklah ozon. Ozon yang terdapat pada lapisan stratosphere yang kita kenal dengan nama ozone layer (lapisan ozon) adalah ozon yang terjadi dari hasil proses alamiah photolysis ini (Greenberg, dkk.1998). Proses semacam ini terjadi pula pada smog (kabut) yang banyak kita dapati di kota-kota besar seperti Jakarta, yang sarat dengan polusi udara (Masithah, 2013).

#### 2. Sumber Non Alamiah

Penyebab utama terjadinya kerusakan ozon adalah Choloro-Fluoro-Carbon (CFC) yang sintetis. CFC mulai diproduksi pada tahun 1920 dan digunakan di industry pada tahun 1930. CFC ini banyak dipakai pada pendingin ruangan, lemari es, pembuatan karet busa dan yang lainnya (Soemirat, 2011). Gas NO<sub>x</sub> dan hydrocarbon dari asap buangan kendaraan bermotor dan berbagai kegiatan industri, merupakan sumber pembawa terbentuknya ozon non alamiah. Selain proses alamiah, ozon juga dapat dibuat dengan mempergunakan peralatan antara lain dengan metode *electrical discharge* dan sinar radioaktif. Pembuatan ozon dengan *electrical discharge* pertama kali dilakukan oleh Siemens pada tahun 1857 dengan mempergunakan metode *dielectric barrier discharge*. Secara alamiah ozon

ada di mana-mana dalam atmosfer. Di permukaan bumi konsentrasinya sekitar 0,02-0,03 ppm. Secara nonalamiah ozon yaitu masuknya zat pencemar oleh aktivitas manusia, yang pada umumnya tanpa disadari dan merupakan produk sampingan, berupa gas-gas beracun, asap, partikel-partikel halus, senyawa belerang, senyawa kimia, buangan panas, dan buangan nuklir (Masithah, 2013).

#### 5.4 Keberadaan Ozon (O<sub>3</sub>) di Udara

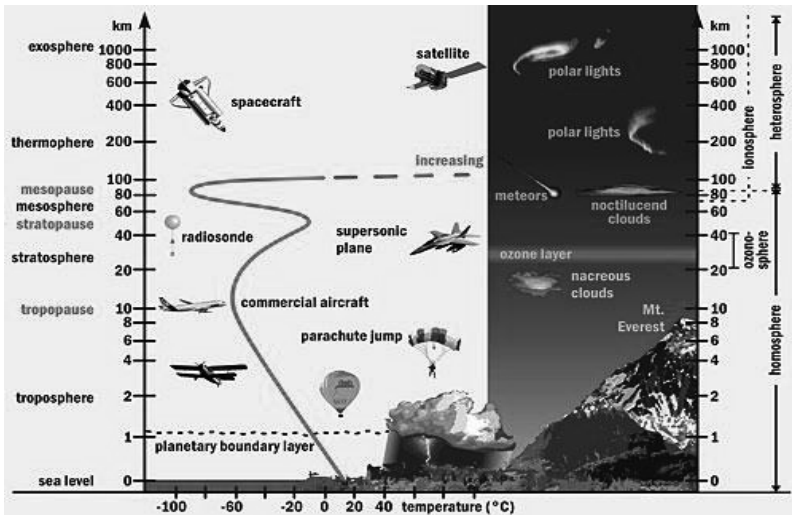
Lapisan ozon merupakan lapisan pelindung atmosfer bumi yang berfungsi sebagai pelindung terhadap sinar matahari. Sinar ultraviolet yang tidak difilter oleh lapisan ozon akan membahayakan manusia. Jika lapisan ozon yang tidak di filter ini sampai di atmosfer, maka permukaan bumi akan menjadi panas yang mengakibatkan kenaikan suhu bumi. Kenaikan suhu bumi juga mengakibatkan ketidaknyamanan hidup di bumi dan menyebabkan naiknya air laut karena es di kutub mulai mencair sehingga beberapa pulau-pulau kecil dan kota di tepi pantai akan tenggelam (Wardhana, 2009). Lapisan ozon berada pada atmosfer yang lapisan pertama yaitu troposfer, 0-20 km diatas permukaan laut (0,02) ppm dan pada lapisan kedua yaitu lapisan stratosfer, 20-45 km (0,1ppm). Lapisan ini dapat menyerap radiasi ultra violet yang dipancarkan matahari (Moestikahadi, 2001).

Sinar matahari terdiri dari cahaya yang kasat matadan tidak kasat mata. Cahaya yang tidak kasat mata sinar infra merah dan ultraviolet yang terdiri dari :

1. Sinar Ultraviolet A (UV-A)
2. Sinar Ultraviolet B (UV-B)
3. Sinar Ultraviolet C (UV-C)

Diantara tiga bagian diatas, UV-C dan UV-B berbahaya bagi makhluk hidup. Ozon mempunyai kemampuan menyerap sinar tersebut sehingga

tidak sampai di bumi sehingga melindungi makhluk hidup dari sinar ultraviolet. Jika gas pencemar udara dari bumi mencapai lapisan ozon, maka proses pembentukan ozon terganggu. Molekul ozon di permukaan bumi berbeda dengan di lapisan stratosfer. Molekul ozon di permukaan bumi merupakan komponen utama dari fotokimia. Ozon di permukaan bumi merupakan molekul beracun sekaligus menjadi sumber polusi udara diberbagai kota besar. Ozon di permukaan bumi terbentuk jika  $O_2$  menyerap sinar UV. Sementara unsur oksigen bergabung dengan molekul yang tidak terurai dan membentuk ozon (EPA, 2003).



Gambar 5.1 Keberadaan Ozon di atmosfer (EPA, 2003)

Penipisan lapisan ozon di stratosfer dapat disebabkan oleh reduksi dari sinar radiasi yang dapat menyebabkan terjadinya *global warming* yang meningkatkan gas dari efek rumah kaca (Martens, 2013).

### 5.5 Kegunaan dan Manfaat Ozon ( $O_3$ )

Secara umum, lapisan ozon sangat bermanfaat bagi kehidupan di bumi karena berfungsi sebagai:

- a. Melindungi makhluk hidup yang ada di bumi dengan cara menyerap hampir 90% radiasi sinar ultraviolet yang dipancarkan oleh matahari. Sinar UV sangat berbahaya dan dapat menyebabkan penyakit kanker kulit, katarak, kerusakan genetik pada sel-sel manusia, hewan maupun tumbuhan.
- b. Memberi efek pada suhu atmosfer yang menentukan suhu dunia.

Ozon juga memiliki kemampuan biologi yang khas sehingga banyak diteliti untuk digunakan dalam dunia medis. Efek medis ozon ditemukan pada abad 19 dan digunakan pertama kali oleh A. Wolff di Jerman pada tahun 1915 (selama Perang Dunia I) sebagai antiseptik. Penggunaan ozon sudah lama diperkenalkan di luar negeri seperti Belgia, Italia, Perancis, Brazil, Rusia, Argentina, Jepang dan Singapura. Sebagai molekul yang memiliki energi yang sangat besar, ozon dapat menginaktivasi bakteri, virus, jamur dan beberapa jenis protozoa, sehingga dapat digunakan sebagai pilihan terapi dalam pengobatan beberapa penyakit dan sebagai terapi tambahan pada penyakit lainnya.

Penggunaan ozon dalam bidang medis sangat luas meliputi: bedah, neurologi, gastroenterologi, diabetes dengan komplikasinya, dermatologi, kosmetologi, obstetri dan ginekologi, urologi, sistem kardiovaskuler, stomatologi, otorhinolaringologi, *locomotor disorder* dan sistem respirasi. Jerman dan negara Balkan lainnya, menunjukkan adanya manfaat ozon yang baik untuk penyembuhan berbagai macam penyakit, termasuk kanker, diabetes, jantung, dan menghambat proses penuaan. Terapi ozon hanya digunakan untuk melengkapi terapi konvensional atau pada kasus di mana tidak ada terapi lain yang efektif (Bocci V, 1999).

Walaupun ozon telah digunakan sebagai desinfektan selama hampir satu abad, dan telah digunakan sebagai terapi alternatif selama 4 dekade, kegunaannya dalam dunia kedokteran masih kontroversial. Pihak yang pro meyakini bahwa terapi ozon merupakan pengobatan yang sangat baik sedangkan pihak yang kontra menyatakan bahwa ozon bersifat toksik dan

tidak boleh digunakan dalam dunia kedokteran. Masalah ini seharusnya tidak dibiarkan begitu saja, karena setiap tahunnya jumlah pasien di dunia yang menjalani terapi ozon bertambah terus (EPA, 2009).

## 5.6 Dampak Lingkungan Pencemaran Ozon (O<sub>3</sub>)

Dalam keadaan normal, ozon dapat menyerap UV-B dan UV-C kecuali UV-A yang akan mencapai bumi. Sinar UV-A ini relative tidak berbahaya. Adanya kerusakan di stratosfer mengakibatkan menipisnya lapisan ozon. Hal ini menyebabkan semakin banyaknya sinar UV-B dapat mencapai bumi. Banyaknya sinar UV-B yang sampai ke bumi berakibat negative terhadap kehidupan di darat dan dilaut. Selain itu, UV-B dapat berakibat negative terhadap bahan-bahan yang digunakan di luar ruangan dan langsung terkena sinar matahari, seperti plastik dan sepat rusak. Gunung-gunung es di kutub utara juga akan mencair yang mengakibatkan naiknya permukaan air laut dunia. Sehingga lambat laun daratan di bumi pun akan tenggelam.

Kerusakan lapisan ozon juga memiliki pengaruh langsung pada pemanasan bumi yang sering disebut sebagai "Global Warming". Sebagian besar ozon stratosfer dihasilkan di kawasan tropis dan diangkut ke ketinggian yang tinggi dengan skala besar putaran atmosfer semasa musim salju hingga musim semi. Umumnya kawasan tropis memiliki ozon yang rendah. Kerusakan ozon juga memberi dampak pada tumbuh-tumbuhan dan hewan yaitu :

### 1. Dampak Terhadap Tumbuh-Tumbuhan Darat

Peningkatan sinar UV-B akan mengganggu ekosistem di darat karena UV-B pada kegiatan asimilasi nitrogen oleh mikroorganisme. Mikroorganisme tersebut penting untuk penyediaan nitrogen dalam tanah. Hal ini mampu dilakukan oleh tumbuhan. Mikroorganisme ini mengalami gangguan akibat besarnya sinar ultraviolet yang sampai ke bumi.ozon juga dapat bereaksi pada bagian atas daun sehingga

terbentuk bintik-bintik. Hal ini tampak pada tanaman anggur, tembakau dan gula bit (Sastrawijaya, 2009).

## 2. Dampak Terhadap Kehidupan Laut

Penipisan lapisan ozon dapat mengganggu kehidupan di laut. Dampak yang cukup memprihatinkan adalah peningkatan sinar ultraviolet yang membunuh organisme kecil seperti plankton yang menjadi dasar dari rantai makanan di laut. Plankton menjadi sumber makanan bagi setiap kehidupan lainnya di laut sangat peka terhadap sinar tersebut. Salah satu jenis plankton adalah fitopankton memproduksi biomassa yang dibuatnya. Hilangnya salah satu komponen rantai makanan akan membawa dampak yang besar bagi ekosistem laut, dan selanjutnya memberi dampak pada ketersediaan makanan di bumi (Otto,1992).

## 5.7 Dampak Kesehatan Pencemaran Ozon (O<sub>3</sub>)

Efek kesehatan yang diakibatkan oleh ozon timbul karena ada reaksi terhadap zat organik yang dilaluinya. Ozon dapat memasuki saluran pernafasan lebih dalam daripada SO<sub>2</sub>. Ozon akan mematikan sel-sel makroflag. Mengstimulir penebalan dinding arteri paru paru dan apabila pemaparan terhadap ozon sudah lama maka dapat terjadi kerusakan paru-paru yang disebut *Emphysema*. Ozon juga dapat menyebabkan depresi pusat pernapasan sehingga pengaturan ventilasi paru-paru dapat terganggu (Soemirat, 2011). Pada tahun 1993-2006, ditemukan bukti yang jelas untuk ambang batas dalam hubungan konsentrasi-respons antara ozon dan semua penyebab kematian di London sekitar 65 mg / m<sup>3</sup>. Perkiraan efek linear gabungan dari semua penyebab kematian untuk daerah perkotaan lebih besar dari daerah pedesaan. Pemaparan ini terjadi selama bulan-bulan musim panas (Richard W dkk, 2012).

Walaupun efek perubahan iklim dan konsekuensi pemanasan global tidak dimengerti secara pasti, beberapa efek langsung terhadap pajanan

peningkatan temperatur dapat diukur, seperti peningkatan kejadian penyakit yang berhubungan dengan kenaikan temperatur, peningkatan angka kematian karena gelombang udara panas seperti yang terjadi di Perancis tahun 2003. Ozon troposfer, yang positif dan sering sangat berkorelasi dengan suhu di sebagian besar lokasi di seluruh dunia, merupakan polutan sekunder yang dihasilkan melalui reaksi fotokimia yang melibatkan prekursor seperti oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida, dan senyawa organik volatil (VOC). Paparan ozon telah dikaitkan dengan berbagai hasil kesehatan, termasuk fungsi paru, perawatan rumah sakit, dan kematian setiap hari. Para peneliti telah dikonseptualisasikan peran ozon dalam studi suhu panas dengan berbagai cara-sebagai pembaur, sebagai efek pengubah dan sebagai co-eksposur (Coleen E dkk, 2012).

Kondisi iklim yang tidak stabil dapat juga menyebabkan peningkatan kejadian bencana alam, seperti badai, angin siklon puting beliung, kekeringan, dan kebakaran hutan, yang berdampak terhadap kesehatan fisik dan mental masyarakat yang terserang. Pola iklim yang terganggu juga menyebabkan efek tidak langsung terhadap kesehatan manusia. Efek terhadap pola hujan yang meningkatkan bencana banjir dapat menyebabkan peningkatan kejadian penyakit perut karena efeknya pada sumber air dan penyediaan air bersih, penyakit malaria, demam berdarah dengue, chikungunya dan penyakit lainnya yang ditularkan melalui rodent seperti leptospirosis. Efek tidak secara langsung ini menjadi sangat serius pada daerah di dunia dengan penduduk miskin. Terdapat sejumlah penyakit yang diprediksi prevalensinya akan meningkat sebagai akibat perubahan iklim. WHO (2004) telah mengidentifikasi beberapa penyakit yang sangat besar kemungkinan karena perubahan iklim telah menyebabkan terjadinya wabah. Telah direkomendasikan memasang sistem peringatan dini untuk memonitor perubahan distribusi penyakit.

Beberapa penyakit yang bukan wabah juga berhubungan dengan perubahan iklim. Penggunaan teknologi dan pengindraan jarak jauh atau Geographical Information System (GIS) telah memungkinkan peningkatan

pemetaan risiko beberapa penyakit. Terdapat sedikit variasi musim terhadap kejadian penyakit infeksi cacing, tetapi terdapat beberapa bukti bahwa kelembaban tanah adalah sangat penting (WHO, 2004) dan sangat dipengaruhi oleh perubahan iklim dan presipitasi air hujan. Pemetaan risiko secara geografis (geographical risk mapping) kecacingan seperti schistozomiasis dan filariasis telah ditangani dengan penggunaan data temperatur, presipitasi dan vegetasi (Soemirat, 2011).

Penyakit diare merupakan penyebab signifikan kesakitan dan kematian secara global. Dua juta anak-anak meninggal setiap tahunnya di negara dengan penduduk berpenghasilan menengah ke bawah walaupun sudah ada peningkatan penggunaan oralit untuk terapinya. Kesakitan dan kematian tersebut berhubungan dengan pemakaian air yang tidak memenuhi syarat kesehatan serta higiene dan sanitasi lingkungan yang tidak memadai. Walaupun demikian, diare juga masih menjadi masalah di negara dengan penduduk berpenghasilan menengah ke atas, karena diare tidak hanya berhubungan dengan higiene dan sanitasi lingkungan, tetapi juga berhubungan dengan praktek higiene dan keamanan pangan. Terdapat variasi musiman dalam penyakit diare, dimana pada peningkatan temperatur berhubungan dengan peningkatan jumlah penderita diare yang masuk rumah sakit di semua bagian belahan bumi ini Richard W dkk, 2012.

Pemanasan global yang terjadi menyebabkan perubahan iklim dan cuaca di seluruh dunia. Sebagian belahan dunia menjadi lebih kering, dan sebagian lagi menjadi lebih basah. Sebagian dunia ada yang menjadi lebih panas dan sebagian lagi menjadi lebih dingin. Semua itu mempengaruhi spesies yang hidup didalamnya, khususnya nyamuk yang sangat peka terhadap perubahan cuaca yang terjadi secara cepat. Perubahan iklim secara tidak langsung mempengaruhi distribusi, populasi, serta kemampuan nyamuk dalam menyesuaikan diri (Martens, 2013).

Nyamuk *Aedes* sebagai vektor penyakit demam berdarah dengue (DBD) hanya berkembang biak pada daerah tropis yang temperaturnya lebih dari 16 oC dan pada ketinggian kurang dari 1.000 meter di atas permukaan



air laut. Namun sekarang nyamuk tersebut telah banyak ditemukan pada daerah dengan ketinggian 1.000–2.195 meter di atas permukaan air laut. Pemanasan global menyebabkan suhu beberapa wilayah cocok untuk berbiaknya nyamuk *Aedes*, dimana nyamuk ini dapat hidup optimal pada suhu antara 24-28 oC. Karena itu mudah difahami bahwa perubahan iklim karena pemanasan global memperluas ruang gerak nyamuk *Aedes* sehingga persebaran daerahnya menjadi lebih luas. Perluasan persebaran daerah ini akan meningkatkan risiko terjangkitnya penyakit DBD di suatu daerah yang sebelumnya belum pernah terjangkit. Secara umum dapat dikatakan bahwa perubahan iklim meningkatkan curah hujan yang berdampak pada meningkatnya habitat larva nyamuk sehingga meningkatkan kepadatan populasi nyamuk. Peningkatan kelembapan juga meningkatkan agresivitas dan kemampuan nyamuk menghisap darah dan berkembang biak lebih cepat. Penelitian laboratoris menyebutkan bahwa tingkat replikasi virus Dengue berhubungan dengan kenaikan temperatur. Dalam penelitian ini ditunjukkan dengan model pengaruh perubahan temperatur secara relatif akan memberikan kesempatan pada virus untuk memasuki populasi manusia yang rentan terhadap risiko terjangkit. Kenaikan suhu memperpendek masa inkubasi virus dalam tubuh vektor (Patz, 2006).

## 5.8 Upaya-Upaya Penurunan Pencemaran Ozon (O<sub>3</sub>)

Dalam memelihara lapisan ozon, seluruh masyarakat harus bertindak dengan cara :

1. Mengurangi atau tidak menggunakan lagi produk-produk rumah tangga yang mengandung zat-zat yang dapat merusak lapisan pelindung bumi (Bahan Perusak Ozon) dari sinar UV.
2. Menggunakan selalu produk-produk yang berlogo ramah ozon.
3. Menggunakan alat pemadam api yang tidak mengandung *Haloncarbon*.

4. Memeriksa dan merawat peralatan pendingin/pengatur suhu dan sistem pemadam api secara berkala untuk memastikan tidak adanya kebocoran BPO (CFC, HCFC atau Halon).
5. Memastikan bahwa CFC/HCFC/Halon yang ada di dalam sistem diambil kembali (*recovery*) dan didaur ulang (*recycle*) dalam proses perawatan dan perbaikan sistem pendingin atau pemadam api.
6. Mengirim CFC/HCFC/Halon yang sudah tidak terpakai ke fasilitas pengolahan BPO bekas seperti Halon Bank, Pusat Reklamasi CFC atau Pemusnahan BPO.
7. Mengganti alat-alat kebutuhan yang berpotensi menghasilkan zat-zat perusak ozon dengan alternatif lain yang lebih ramah lingkungan misalnya pembangkit tenaga listrik dari sel surya, angin atau arus air terjun/turbin.
8. Diperlukan upaya meningkatkan kesadaran dan partisipasi aktif masyarakat dalam program perlindungan lapisan ozon, pemahaman mengenai penanggulangan penipisan lapisan ozon, memperkenalkan bahan, proses, produk, dan teknologi yang tidak merusak lapisan ozon dengan cara mengadakan seminar "Save Our Earth".
9. Tidak membakar hutan maupun menebang pohon-pohon secara liar.

Isu penipisan lapisan ozon telah dijadikan isu internasional oleh Badan Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) untuk Lingkungan Hidup, *United Nations Environment Programme* (UNEP) sejak tahun 1987. Atas permintaan "United Nations Environment Programme" (UNEP), WMO memulai Penyelidikan Ozon Global dan Proyek Pemantauan untuk mengkoordinasi pemantauan dan penyelidikan ozon dalam jangka panjang. Semua data dari penelitian pemantauan di seluruh dunia diantarkan ke Pusat Data Ozon Dunia di Toronto, Kanada, yang tersedia kepada masyarakat ilmiah internasional. Pada tahun 1977, pertemuan pakar UNEP mengambil tindakan Rencana Dunia terhadap lapisan ozon, dengan ditandatanganinya Protokol Montreal pada tahun 1987, suatu perjanjian untuk perlindungan terhadap lapisan

ozon. Protokol ini kemudian diratifikasi oleh 36 negara termasuk Amerika Serikat. Kemudian pada tahun 1990 diumumkan pelarangan total terhadap penggunaan CFC sejak diusulkan oleh Komunitas Eropa (sekarang Uni Eropa) pada tahun 1989, yang juga disetujui oleh Presiden Amerika Serikat, George Bush.

Untuk memonitor berkurangnya ozon secara global, *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) meluncurkan Satelit Peneliti Atmosfer. Satelit dengan berat 7 ton ini mengorbit pada ketinggian 600 km (372 mil) untuk mengukur variasi ozon pada berbagai ketinggian dan menyediakan gambaran jelas pertama tentang kimiawi atmosfer di atas. Perhatian negara-negara di dunia terhadap penipisan lapisan ozon sebenarnya sudah ada sebelum lahirnya Protokol Montreal. Yaitu dengan terciptanya kebijakan dalam perlindungan lapisan ozon pada tahun 1981 melalui keputusan UNEP Governing Council, merupakan kelompok kerja yang beranggotakan wakil dari beberapa negara. Kelompok kerja ini menyusun suatu konsep “Konvensi untuk Perlindungan Lapisan Ozon.” Sampai kemudian pada tahun 1985 dokumen ini dikenal dengan Konvensi Wina, yang berisikan tentang perlindungan terhadap lapisan ozon. Dokumen ini diadopsi oleh negara-negara Uni Eropa serta 21 negara lainnya di dunia. Konvensi Wina merupakan titik awal pergerakan dalam menyelamatkan lapisan ozon. Konvensi Wina merupakan landasan hukum pelaksanaan perlindungan lapisan ozon ditingkat internasional yang mensyaratkan seluruh negara pihak untuk bekerjasama melaksanakan pengamatan, penelitian dan pertukaran informasi guna memperoleh pemahaman yang lebih baik dan mengkaji dampak kegiatan manusia terhadap lapisan ozon serta dampak penipisan lapisan ozon terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Tak lama setelah itu muncul Protokol Montreal pada tanggal 16 September 1987. Protokol Montreal memuat aturan pengawasan produksi, konsumsi dan perdagangan bahan-bahan perusak lapisan ozon. Dalam protokol tersebut tercantum jenis-jenis bahan kimia yang masuk dalam daftar pengawasan serta jadwal penghapusan masing-masing jenis BPO. Protokol Montreal

kemudian mengalami penyempurnaan melalui penetapan Amandemen London (1989), Amandemen Kopenhagen (1992), Amandemen Montreal (1997) serta Amandemen Beijing (1999).

Salah satu upaya masyarakat dalam membantu upaya pemerintah untuk menanggulangi menipisnya lapisan ozon yaitu dengan cara penanaman tumbuhan dan pohon-pohon sekaligus melestarikannya. Karena dengan banyaknya pohon, maka banyak pula oksigen yang dihasilkan oleh tumbuhan atau pohon tersebut. Dengan banyaknya kandungan oksigen di udara bebas maka semakin banyak juga ozon yang terbentuk dan naik ke atmosfer. Sehingga membentuk lapisan ozon yang tebal dan stabil keberadaannya. Kegiatan ini merupakan salah satu konsep *Green City*. *Green City* merupakan salah satu konsep pendekatan perencanaan kota yang berkelanjutan. *Green City* juga dikenal sebagai Kota Ekologis atau kota yang sehat. Artinya adanya keseimbangan antara pembangunan dan perkembangan kota dengan kelestarian lingkungan. Dengan kota yang sehat dapat mewujudkan suatu kondisi kota yang aman, nyaman, bersih, dan sehat untuk dihuni penduduknya dengan mengoptimalkan potensi sosial ekonomi masyarakat melalui pemberdayaan forum masyarakat, difasilitasi oleh sektor terkait dan sinkron dengan perencanaan kota. Untuk dapat mewujudkannya, diperlukan usaha dari setiap individu anggota masyarakat dan semua pihak terkait (stakeholders).

Konsep *Green City* ini sesuai dengan pendekatan-pendekatan yang disampaikan *Hill, Ebenezer Howard, Patrick Geddes, Alexander, Lewis Mumford, dan Ian McHarg*. Implikasi dari pendekatan-pendekatan yang disampaikan diatas adalah menghindari pembangunan kawasan yang tidak terbangun. Hal ini menekankan pada kebutuhan terhadap rencana pengembangan kota dan kota-kota baru yang memperhatikan kondisi ekologis lokal dan meminimalkan dampak merugikan dari pengembangan kota, selanjutnya juga memastikan pengembangan kota yang dengan sendirinya menciptakan aset alami local. Kota dapat dimasukkan sebagai *Green City*, antara lain memiliki kriteria sebagai berikut:

1. Pembangunan kota harus sesuai peraturan undang-undang yang berlaku, seperti Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 Penanggulangan Bencana (Kota hijau harus menjadi kota waspada bencana), Undang-Undang No. 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang, dan Undang-Undang No.32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, dan peraturan lainnya.
2. Konsep Zero Waste (pengolahan sampah terpadu, tidak ada yang terbuang).
3. Konsep Zero Run-off (semua air harus bisa diresapkan kembali ke dalam tanah, konsep ekodrainase).
4. Infrastruktur Hijau (tersedia jalur pejalan kaki dan jalur sepeda).
5. Transportasi Hijau (penggunaan transportasi massal, ramah lingkungan berbahan bakar terbarukan, mendorong penggunaan transportasi bukan kendaraan bermotor - berjalan kaki, bersepeda, delman/dokar/andong, becak).
6. Ruang Terbuka Hijau seluas 30% dari luas kota (RTH Publik 20%, RTH Privat 10%)
7. Bangunan Hijau
8. Partisipasi Masyarakat (Komunitas Hijau).

Dalam Undang-undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang disebutkan bahwa pelaksanaan penataan ruang merupakan upaya pencapaian tujuan penataan ruang melalui pelaksanaan Perencanaan Ruang, Pemanfaatan Ruang dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang. Kebijakan pemanfaatan ruang adalah mewujudkan pelestarian fungsi lingkungan hidup, meningkatkan daya dukung lingkungan alami dengan lingkungan buatan, serta menjaga keseimbangan ekosistem guna mendukung proses pembangunan berkelanjutan untuk kesejahteraan masyarakat. Berdasarkan pengertian pemanfaatan ruang menurut undang-undang tersebut pada prinsipnya dalam proses pemanfaatan ruang khususnya di wilayah perkotaan secara menyeluruh dan terpadu, dapat diwujudkan melalui

pendekatan Green City. Dengan konsep Green City krisis perkotaan dapat kita hindari, sebagaimana yang terjadi di kota-kota besar dan metropolitan yang telah mengalami obesitas perkotaan, apabila kita mampu menangani perkembangan kota-kota kecil dan menengah secara baik, antara lain dengan penyediaan ruang terbuka hijau, pengembangan jalur sepeda dan pedestrian, pengembangan kota kompak, dan pengendalian penjalaran kawasan pinggiran. Terdapat beberapa pendekatan Green City yang dapat diterapkan dalam manajemen pengembangan kota. Pendekatan ini terdiri atas 5 konsep utama yaitu:

1. Konsep kawasan berkeselimbangan ekologis yang bisa dilakukan dengan upaya penyeimbangan air, CO<sub>2</sub>, dan energi.
2. Konsep desa ekologis yang terdiri atas penentuan letak kawasan, arsitektur, dan transportasi dengan contoh penerapan antara lain: kesesuaian dengan topografi, koridor angin, sirkulasi air untuk mengontrol iklim mikro, efisiensi bahan bakar, serta transportasi umum.
3. Konsep kawasan perumahan berkoridor angin (wind corridor housing complex), dengan strategi pengurangan dampak pemanasan. Caranya, dengan pembangunan ruang terbuka hijau, pengontrolan sirkulasi udara, serta menciptakan kota hijau.
4. Konsep kawasan pensirkulasian air (water circulating complex). Strategi yang dilakukan adalah daur ulang air hujan untuk menjadi air baku.
5. Konsep taman tadah hujan (rain garden) (Balai Informasi Penataan Ruang, 2014).

## Daftar Pustaka

Balai Informasi Penataan Ruang. 2014. Konsep green city Harus diterapkan dalam pemanfaatan ruang. Di download tanggal 14 Desember

2014 <http://werdhapura.penataanruang.net/component/content/article/12-umumic/178-green-city>

1. Bocci V. 1999. *Biological and clinical effects of ozone. Has ozone therapy a future in medicine?* British J of Biomedical Science. England.  
Colleen E. Reid, dkk. 2012. *The Role of Ambient Ozone in Epidemiologic Studies of Heat-Related Mortality.* volume 120, number 12, December 2012. didownload pada tanggal 14 Desember 2014 at <http://ehp.niehs.nih.gov/1003339/>
  - EPA. 2003. *Ozone, Bad Nearby.* Washington DC. EPA-451/K-03-001  
EPA. 2009. *Ozone and Your Health.* Washington DC. EPA-456/F-09-001
  2. Greenberg, dkk.1998. *Panduan Pemberitahuan Lingkungan Hidup.* Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
  3. Kementerian Lingkungan Hidup. *Pengendalian Pencemaran Udara.* Caturgriya Naradipa. Jakarta.
  4. Mallongi A, Natsir MF, Dwi R, Astuti P, Rauf AU, Rachmat M, Muhith A. 2020. Potential ecological risks of mercury contamination along communities area in tonasa cement industry Pangkep, Indonesia?. *Enferm Clin.* 30:119–122.
  5. Mallongi, A.; Stang S.; Astuti, R.D.P.; Rauf, A.U.; Natsir M.F., (2023). Risk assessment of fine particulate matter exposure attributed to the presence of the cement industry. *Global J. Environ. Sci.Manage.*, 9(1): 1-16.
- Martens, Pim. 2013. *Modelling The Impacts of Global Warming and Ozone Depletion.* Earthscan. New York. Di download tanggal 14 Desember 2014 at <http://books.google.co.id/books>
- Masithah,Itha. 2013. *Jurnal Menipisnya Lapisan Ozon.* Juni 2013: 1-11. Didownload pada tanggal 14 Desember 2014 at [www.google.com/ithamasithah25.files.wordpress.com/](http://www.google.com/ithamasithah25.files.wordpress.com/)

- Moestikahadi, Soedomo. 2001. *Pencemaran Udara*. TB Bandung. Bandung.
6. Rauf, A.U.; Mallongi, A.; Lee, K.; Daud, A.; Hatta, M.; Al Madhoun, W.; Astuti, R.D.P. Potentially Toxic Element Levels in Atmospheric Particulates and Health Risk Estimation around Industrial Areas of Maros, Indonesia. *Toxics* 2021, 9, 328. <https://doi.org/10.3390/toxics9120328>
7. Richard W. Atkinson, dkk. 2012. *Concentration–Response Function for Ozone and Daily Mortality: Results from Five Urban and Five Rural U.K. Populations*.  
volume 120 | number 10 | October 2012 . didownload pada tanggal 14  
Desember 2014 at <http://ehp.niehs.nih.gov/1104108/>
8. Sastrawijaya, A. Tresna. 2009. *Pencemaran Lingkungan*. Rineka Cipta. Jakarta.
9. Soemarwoto, Otto. 1992. *Indonesia Dalam Kancah Isu Lingkungan Global*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
10. Wardhana, Wisnu Arya. 2009. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Penerbit Andi. Yogyakarta.





# BAB 6

## PENCEMARAN SULFUR DIOKSIDA DI UDARA DAN PENANGGULANGANNYA

*Satu buah buku tidaklah cukup untuk membuat anda menjadi seorang yang ahli, jadi jadikan diri anda sebagai pustaka berjalan yang selalu siap memberi informasi. (Anwar Mallongi, 2014).*

### 6.1 Pendahuluan

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstant. Komponen yang konsentrasinya paling bervariasi adalah air dalam bentuk uap  $H_2O$  dan  $CO_2$ . Jumlah uap air yang terdapat di udara bervariasi tergantung dari cuaca dan suhu. Udara yang terhirup 99% terdiri atas gas nitrogen dan oksigen, selebihnya adalah gas, bahan cairan dan bahan padat yang halus. Udara bumi terletak dalam *troposphere* setebal 17 km dari permukaan bumi dan memberi udara kehidupan pada manusia. *Troposphere* ini juga mampu menyerap bahan pencemar alami, seperti gas letusan gunung, atau bahan cemar buatan manusia (antropogenik) (Seinfeld, 2006). Badan Perlindungan Lingkungan pada saat ini telah menetapkan lima besar komponen kontaminan udara yang dapat menimbulkan bahaya yang

signifikan pada kesehatan manusia ketika terjadi polusi udara. Salah satunya yaitu  $\text{SO}_2$  selain 4 kontaminan lainnya (PM, CO, photochemical oxidants, dan  $\text{NO}_2$ ). Tingkat polusi udara yang bisa menyebabkan bahaya yang signifikan bagi kesehatan manusia, dari polutan  $\text{SO}_2$  adalah 2620 micrograms/cubic meter (1.0 part per million. (EPA, 2012).

Kegiatan transportasi memberikan kontribusi terbesar terhadap pencemaran udara di kota-kota besar. Emisi kendaraan bermotor yang dikeluarkan melalui knalpot, berupa senyawa kimia yang berbahaya bagi atmosfer berasal dari proses pembakaran, salah satunya adalah  $\text{SO}_2$ , selain  $\text{CO}_2$ , CO, NO, dan partikel (KLH, 2010). Permasalahan pencemaran udara telah mengkhawatirkan di beberapa kota besar di Indonesia, seperti Jakarta, Bandung, Semarang, Surabaya, dan Makassar. Pencemaran udara menurut Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999 adalah masuknya atau dimasukkannya zat energi atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Berdasarkan dari beberapa hasil penelitian dilaporkan bahwa kualitas udara di Kota Makassar sudah mengkhawatirkan, salah satunya akibat emisi kendaraan bermotor. Pertambahan jumlah kendaraan bermotor di kota Makassar tidak dibarengi dengan perluasan dan pertambahan jalan serta penanaman tanaman pelindung sehingga berimplikasi terhadap adanya jalan/tempat-tempat tertentu pada jam-jam tertentu dimana kendaraan berjalan lambat bahkan tidak bergerak dalam beberapa menit dengan mesin tetap hidup sehingga pada tempat tersebut konsentrasi polutan meningkat (Susilawaty, 2009).

Sehingga pencemaran udara telah menjadi satu permasalahan yang akut. Kualitas udara di perkotaan, tanpa disadari sebenarnya telah menurunkan kualitas hidup masyarakatnya sendiri. Setiap manusia bernafas dan yang dihirup udara tercemar oleh bahan berbahaya dan beracun, akan berdampak serius pada kesehatan manusia. Risiko kesehatan yang dikaitkan dengan pencemaran udara di perkotaan secara umum banyak menarik

perhatian dalam beberapa dekade belakangan ini. Di banyak kota besar, termasuk Kota Makassar, gas buang kendaraan bermotor menyebabkan ketidaknyamanan pada orang yang berada di tepi jalan dan menyebabkan masalah pencemaran udara. Beberapa studi epidemiologi menyimpulkan adanya hubungan yang erat antara tingkat pencemaran udara perkotaan dengan angka kejadian (prevalensi) penyakit pernafasan (Kusmaningrum, 2008). Salah satu zat pencemar udara dalam bentuk gas yang paling populer belakangan ini adalah gas Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dapat juga disebut sebagai oksida belerang, asam belerang unhidrida dan oksida belerang. Pembakaran bahan bakar fosil akan menghasilkan kira-kira 30 bagian sulfur dioksida untuk setiap bagian sulfur trioksida. Oksida-oksida sulfur biasanya terdiri atas sulfur dioksida, sulfur trioksida, asam sulfit, dan sulfat. Sulfur dioksida merupakan bagian yang paling dominan sehingga oksida-oksida sulfur biasanya diukur sebagai sulfur dioksida.

## 6.2 Karakteristik $\text{SO}_2$

Menurut G. Tyler Miller, JR, dalam bukunya *“Living in the Environment”* Wadsworth Inc, 1992 dari ratusan bahan cemar udara dalam troposphere terdapat 9 kelompok bahan cemar penting yakni : Karbon Dioksida, Sulfur Oksida, Nitrogen Oksida, *Volatile Organic Compounds (VOCs)*, *Suspended Particular Matter (SPM)*, *Photochemical Oxidant*, bahan radioaktif, panas, dan kebisingan (Soedomo, 2001). Salah satu bagian Sulfur Oksida adalah Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) yang merupakan polutan klasik. Gas ini tidak berwarna, jernih, berbau tajam/menyengat, dan membahayakan manusia. Sulfur dioksida di udara stabil dalam beberapa hari pada udara kering, sedangkan pada kondisi kelembaban yang tinggi terikat pada uap air. Sulfur dioksida di udara 98 % merupakan gas  $\text{SO}_2$  dan sisanya dalam bentuk gas sulfur trioksida ( $\text{SO}_3$ ) dan kabut asam sulfat (Susilawaty, 2009).

Sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) merupakan gas buang yang larut dalam air yang langsung dapat terabsorpsi di dalam hidung dan sebagian besar saluran

ke paru-paru. Karena partikulat di dalam gas buang kendaraan bermotor berukuran kecil, partikulat tersebut dapat masuk sampai ke dalam alveoli paru-paru dan bagian lain yang sempit. Partikulat gas buang kendaraan bermotor terutama terdiri jelaga (hidrokarbon yang tidak terbakar) dan senyawa anorganik (senyawa-senyawa logam, nitrat dan sulfat). Sulfur dioksida di atmosfer dapat berubah menjadi kabut asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) dan partikulat sulfat (Cunningham, 2004). Sulfur dioksida juga bersifat korosif, secara langsung gas ini dapat merusak hewan dan tumbuhan. Di atmosfer, sulfur dioksida dioksidasi menjadi sulfur trioksida ( $SO_3$ ) yang bereaksi dengan uap air atau larut dalam droplet air membentuk asam sulfur ( $H_2SO_4$ ), komponen utama hujan asam. Partikel padatan yang sangat kecil atau tetesan cairan dapat membawa ion asam sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) hingga jarak yang jauh melalui udara. Di Amerika partikel sulfat dan dropletnya mengurangi visibilitas hingga 80% (Cunningham, 2004).

### 6.3 Sumber – Sumber $SO_2$

Bahan Pencemar udara dapat dibedakan antara yang primer, yakni langsung masuk udara akibat kejadian alami, seperti zat partikulat dari gunung yang meletus dan pencemaran akibat kegiatan manusia, dan yang sekunder, seperti sulfur acid yang terbentuk di udara akibat reaksi kimia dengan bahan cemar primer dan komponen udara lainnya (Neiburger, 1995). Gas sulfurdioksida ( $SO_2$ ) adalah gas yang tidak berbau bila berada konsentrasi rendah tetapi akan memberikan bau yang tajam pada konsentrasi pekat. Sulfurdioksida berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti minyak bumi dan batubara. Pembakaran batubara pada pembangkit listrik adalah sumber utama pencemaran  $SO_2$ . Selain itu berbagai proses industri seperti pembuatan kertas dan peleburan logam-logam dapat mengemisikan  $SO_2$  dalam konsentrasi yang relatif tinggi (Porteous, 1981).

Sumber alami sulfur di atmosfer meliputi evaporasi air laut, erosi sulfat yang mengandung debu dari tanah kering, asap dari vulkanik,

dan emisi biogenic H<sub>2</sub>S dan sulfur organik dan kesenyawaannya, seperti *dimethylsulfida, metal mercaptan, carbon disulfide, carbonyl sulfide*. Emisi total sulfur setiap tahunnya dari semua sumber mencapai 114 juta ton metric. Sulfur terdapat dalam berbagai bahan mentah, termasuk minyak mentah, batu bata, atau biji yang mengandung logam, seperti aluminium, tembaga, seng, timah, dan besi. Gas-gas SO<sub>2</sub> terbentuk ketika terjadi pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur, atau pada saat penyulingan minyak dan biji logam (Fardiaz, 1992). Sumber antropogenik mengemisikan dua per tiga dari total sulfur, namun umumnya di daerah perkotaan 90% sulfur di udara berasal dari sumber antropogenik. Bentuk utama sulfur antropogenik adalah SO<sub>2</sub> dari pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur (batu bara dan minyak) dan proses industri. Cina dan Amerika merupakan sumber terbesar sulfur antropogenik, terutama dari pembakaran batu bara (Amqam, 2006).

Sulfur dioksida SO<sub>2</sub> bersumber dari panas dan fasilitas pembangkit listrik yang menggunakan minyak dan batu bara yang mengandung sulfur, pabrik asam sulfat. Emisi sulfur dioksida terutama timbul dari pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur terutama batubara yang digunakan untuk pembangkit tenaga listrik atau pemanasan rumah tangga (KLH, 2010). Lebih dari 65% pelepasan SO<sub>2</sub> di udara atau lebih dari 13 juta per tahun, berasal dari peralatan elektrik, khususnya pembakaran batu bara. Sumber lainnya adalah industri yang membuat produk dari bahan mentah, misalnya penyulingan minyak tanah dan industri semen. Demikian juga kereta api, kapal besar dan berbagai peralatan diesel yang tidak digunakan di jalan raya (*non-road equipment*) melakukan pembakaran bahan bakar sulfur tinggi dan mengemisikan SO<sub>2</sub> dalam jumlah yang besar (Amqam, 2006). Sebagai faktor yang signifikan dalam iklim, sangat penting untuk menegaskan peranan dari sumber-sumber yang bervariasi dari aerosol stratosfer seperti dari penyebab alami dan akibat aktivitas manusia yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Dimana SO<sub>2</sub> dari sumber aktivitas masif manusia yang dapat berdampak potensial terhadap

stratosfer melalui transportasi troposfer ke stratosfer, yang meliputi proses *lofting*, *konvektif*, radiasi lambat, pendakian dan transportasi isentropik. Pengamatan menunjukkan bahwa kedalaman optik dari lapisan aerosol stratosfer antara 20 hingga 30 km mengalami peningkatan 4-10% per tahun sejak tahun 2000 dimana menjadi hal yang signifikan pada iklim bumi. Hal yang berkontribusi besar terhadap itu ada dua, yaitu : erupsi gunung merapi dan dari pembakaran batu bara. (Nelly, 2013).

Industri di Amerika Serikat dan belahan bumi utara, sebagai aktivitas manusia menghasilkan  $\text{SO}_2$  lima kali lebih banyak daripada sumber-sumber alam. Di seluruh dunia, angka itu sekitar dua kali lipat. Pada tahun 1985 di Amerika, pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan sekitar dua-pertiga  $\text{SO}_2$  dari seluruh antropogenik (aktivitas manusia). Hal tersebut merupakan pelanggaran buruk dimana terjadi pembakaran batu bara dengan belerang tinggi. Aktivitas peleburan logam dan fasilitas industri untuk pembakaran bahan bakar lainnya juga menghasilkan 15 % sampai 20 %  $\text{SO}_2$ . Peleburan logam mengemisikan  $\text{SO}_2$  karena banyak bijih logam mengandung sulfur. Petroleum mengandung belerang juga, tapi bisa lebih mudah dinetralkan dibandingkan batubara (Nelly, 2014).  $\text{SO}_2$  adalah kontributor utama hujan asam. Di dalam awan dan air hujan  $\text{SO}_2$  konversi menjadi sulfur dan aerosol sulfur di atmosfer.  $\text{SO}_2$  pada saat ini baru bisa teramati secara lokal di sekitar sumber-sumber titik yang besar, seperti pembangkit listrik dan industri, meskipun sulfur adalah salah satu senyawa kimia yang terkandung dalam bensin dan solar (Porteous, 1981).

#### 6.4 Keberadanan $\text{SO}_2$ di Udara

Lingkungan atmosfer terdiri dari campuran gas yang meliputi kira-kira 10-16 km dari permukaan bumi. Terdiri dari oksigen (21%), nitrogen (78%), karbondioksida (sekitar 0,003%), argon (kurang dari 1%) dan gas runutan lainnya serta uap air yang jumlahnya beragam. Komposisi ini telah terbentuk secara perlahan-lahan sejak awal kehidupan bumi, sebelum

jumlah karbondioksida jauh melebihi kandungan oksigen. Sejalan dengan evolusi tanaman hijau, karbon dioksida diubah melalui fotosintesis menjadi oksigen atmosfer dan karbon disimpan di lapisan sedimen (Soedomo, M. 2001).

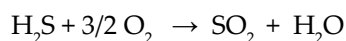
Suatu campuran heterogen dari zat yang bahaya, seperti debu, garam, dan berbagai gas, memasuki atmosfer dari sumber alamiah dan antropogenik. Tambahan antropogenik yang penting dihasilkan dari penggunaan bahan bakar dari fosil, khususnya dalam mesin pembakaran internal, pembangkit tenaga listrik, dan peleburan bijih-bijih mineral. Berbeda dengan pencemaran perairan, pencemar atmosfer seringkali terserap ke seluruh dunia dan mempunyai arti yang menyeluruh. Didalam air hujan yang dipengaruhi oleh pencemar atmosfer, penambah keasaman biasanya disebabkan oleh tiga asam mineral : asam sulfurat, nitrat, dan hidroklorat, dengan jumlah ion sulfat yang menonjol. Sulfur terdapat dalam batu bara dalam jumlah 1-3% dan di dalam hasil-hasil minyak bumi jumlahnya dapat lebih tinggi. Sumber-sumber sulfur lainnya yang penting adalah peleburan bijih sulfida dan gunung berapi. Pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan sulfur oksida yang kemudian dapat dioksidasi dan diubah menjadi asam sulfurat. (Soedomo, M. 2001).

Oksidasi sulfur dioksida dalam buangan gas sangat dipengaruhi oleh kelembaban relatif. Sedikit oksidasi terjadi pada kelembaban relatif dibawah 70%, tetapi pada kelembaban yang lebih tinggi terdapat oksidasi yang relatif lebih cepat dan perubahan menjadi asam sulfurat.  $\text{SO}_2$  merupakan gas pencemar di udara yang konsentrasinya paling tinggi di daerah kawasan industri dan daerah perkotaan. Gas ini dihasilkan dari sisa pembakaran batu bara dan bahan bakar minyak. Di dalam setiap survei pencemaran udara, gas ini selalu diperiksa (Chandra, 2007). Keberadaan di lingkungan sebagai akibat aktivitas sehari-hari seperti pembakaran bahan bakar minyak (BBM), pertambangan minyak dan batu bara, peleburan besi sulfur, incinerator, industri baja, industri asam sulfat, industri selulosa, industri pulp dan kertas dan lain-lain (Leighton, 1971). Jumlah  $\text{SO}_2$  karena oksidasi  $\text{H}_2\text{S}$  adalah

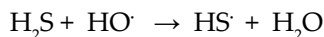


80%. Sisa 20% SO<sub>2</sub> lagi adalah hasil ulah manusia, yakni akibat bahan bakar yang mengandung belerang dan pelelehan logam non-fero, kilang minyak dan letusan gunung. Dan 20% ini yang 16% adalah akibat pembakaran zat-zat yang mengandung belerang seperti minyak bumi dan batubara. Inilah yang membahayakan kesehatan di kota-kota, karena penyebaran SO<sub>2</sub> di muka bumi tidak merata. Juga tergantung kepada tipe bahan yang dibakar. Kandungan batubara dan minyak bumi akan belerang bermacam-macam. Pencemar yang paling buruk ialah bahan bakar yang rendah dan murah, karena mengandung mengandung belerang yang tinggi (Sastrawijaya, 2009). Secara global senyawa-senyawa belerang dalam jumlah cukup besar masuk ke atmosfer melalui aktivitas manusia sekitar 100 juta metric ton belerang setiap tahunnya, terutama sebagai SO<sub>2</sub> dari pembakaran batu bara dan gas buang pembakaran bensin. Jumlah yang cukup besar dari senyawa belerang juga dihasilkan oleh kegiatan gunung berapi dalam bentuk H<sub>2</sub>S, proses perombakan bahan organik, dan reduksi sulfat secara biologis. Jumlah yang dihasilkan proses biologis ini dapat mencapai kurang lebih 1 juta metric ton H<sub>2</sub>S per tahun (Achmad, 2004).

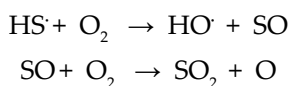
Sebagian dari H<sub>2</sub>S yang mencapai atmosfer secara cepat menjadi SO<sub>2</sub> melalui reaksi :



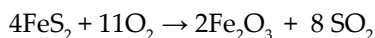
Reaksi bermula dari pelepasan ion hidrogen oleh radikal hidroksil,



Yang kemudian dilanjutkan dengan reaksi berikut ini menghasilkan SO<sub>2</sub>



Hampir setengahnya dari belerang yang terkandung dalam batu bara dalam bentuk pyrit, FeS<sub>2</sub>, dan setengahnya lagi dalam bentuk sulfur organik. Sulfur dioksida yang dihasilkan oleh perubahan pyrit melalui reaksi sebagai berikut :



Standar kandungan SO<sub>2</sub> di udara untuk daerah perindustrian dan pemukiman perlu dibedakan. Jika dinyatakan dalam bpj (ppm) akan diperoleh tabel di bawah ini (Sastrawijaya, 2009) :

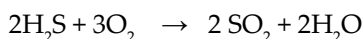
**Tabel 5.1** Konsentrasi Maksimum SO<sub>2</sub> dengan Waktu

Periode, rata-rata	Konsentrasi maksimum SO <sub>2</sub>	
	Pemukiman	Industri/Dagang
Satu jam	0,025 bpj	0,040 bpj
24 jam	0,10 bpj	0,20 bpj
Satu tahun	0,02 bpj	0,05 bpj

## 6.5 Kegunaan dan Manfaat SO<sub>2</sub>

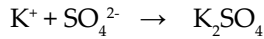
Sebagai indikator yang paling baik dalam menentukan derajat suatu kasus pencemaran adalah dengan cara mengukur atau memeriksa konsentrasi gas sulfur dioksida (Chandra, 2007).

Gas SO<sub>2</sub> juga memiliki manfaat dalam bidang pertanian. Berikut reaksi oksidasi H<sub>2</sub>S :

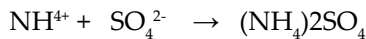


Gas H<sub>2</sub>S diperoleh dari bakteri anaerob yang membusuk. Dalam pertanian, gas SO<sub>2</sub> yang terbentuk akan bereaksi dengan uap air membentuk asam sulfat. Reaksi ini sama dengan yang terjadi dalam tubuh. Jika terdapat

ion kalium  $K^+$ , maka akan terbentuk kalium sulfat yang merupakan pupuk yang baik bagi tanaman.



Sebelum menanam biasanya para petani membajak tanah, hal tersebut karena petani melihat dari segi kimianya. Selain untuk menggemburkan tanah, juga agar ada oksigen yang masuk melalui rongga-rongga tanah dan menghasilkan  $SO_2$  yang bermanfaat sebagai pupuk alami.  $SO_2$  juga dapat bereaksi dengan amoniak membentuk amoniak sulfat yang juga merupakan pupuk yang baik, seperti reaksi dibawah ini :



## 6.6 Dampak Lingkungan Pencemaran $SO_2$

Sulfur dioksida dalam atmosfer dapat berhubungan timbal balik dengan makhluk hidup dalam berbagai cara. Sulfur dioksida dan hujan asam mempunyai bermacam-macam hubungan timbal dengan fisiologi dan biokimiawi tanaman. Ia dapat diserap pada permukaan lembab tanaman, tanah, sistem perairan, dan sebagainya. Atau dapat berubah menjadi asam sulfat dan dapat tertinggal dalam atmosfer sebagai butiran aerosol yang dihilangkan oleh presipitasi. Presipitasi mengandung 40-80% sulfur yang tersimpan di dalam tanah dan sisanya secara langsung terserap pada permukaan. Penggunaan cerobong asap yang tinggi bersamaan dengan keadaan meteorologi dan atmosfer yang sesuai dapat menyebabkan perpindahan dan penimbunan sulfat ribuan kilometer dari sumber emisi (Hill, M. 2004).

Secara umum, dampak pencemaran  $SO_2$  pada lingkungan dapat dikategorikan atas beberapa bagian, yaitu dampak terhadap tanaman, dampak terhadap bahan lain selain tanaman, dan dampak terhadap

kehidupan akuatik. Pembangkit listrik yang menggunakan bahan minyak atau batubara menimbulkan pencemaran udara dengan SO<sub>2</sub>. Batu bara mengandung belerang antara 1-8%. SO<sub>2</sub> jika bereaksi dengan kabut berisi uap air akan membentuk asam sulfat. Kedua zat ini akan memudahkan barang logam berkarat. Asam yang terbentuk di awan akan turun ke tanah dan akan menimbulkan bahaya bagi tanaman. Tanaman rendah lebih dahulu menderita (Sastrawijaya, 2009).

Seperti yang dijelaskan di atas, belerang dioksida berbahaya bagi tanaman, karena dengan adanya gas ini, pada konsentrasi tinggi dapat membunuh jaringan pada daun (*necrosis* daun). Pinggiran daun dan daerah di antara tulang-tulang daun rusak. Secara kronis SO<sub>2</sub> menyebabkan terjadinya klorosis. Kerusakan tanaman ini akan diperparah dengan kenaikan kelembaban udara. Belerang dioksida di atmosfer akan diubah menjadi asam sulfat. Oleh karena itu di daerah dengan adanya pencemaran oleh SO<sub>2</sub> yang cukup tinggi, tanaman akan rusak oleh aerosol asam sulfat (Achmad, 2004). Sementara menurut (Susilawaty, 2009), pada tanaman, gas SO<sub>2</sub> merupakan *phitotoksik*, dan pada konsentrasi yang melebihi 185 PPB, gas ini menimbulkan kerusakan/noda di pinggir daun atau urat daun menjadi berwarna putih hingga kekuning-kuningan hingga menurunkan hasil tanaman. Dari (Connell, 2006) mengatakan, SO<sub>2</sub> memiliki pengaruh terhadap ekosistem darat, dalam hal ini mempengaruhi tanamanaan. Adapun pengaruh potensial dari presipitasi asam terhadap tanaman dapat berupa pengaruh langsung dan pengaruh tidak langsung, yang dipaparkan dengan lengkap sebagai berikut :

Pengaruh Langsung :

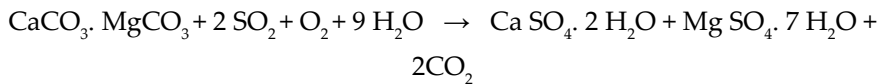
1. Kerusakan pada Struktur Permukaan Pelindung, seperti kutikula
2. Gangguan fungsi normal sel-sel penjaga
3. Keracunan pada sel-sel tanaman setelah difusi zat-zat asam melalui stomata atau kutikula.
4. Gangguan pada metabolisme normal atau pertumbuhan tanpa nekrosis sel-sel tanaman.

5. Gangguan pada prose eksudasi daun dan akar
6. Gangguan pada proses reproduksi
7. Interaksi sinergis dengan faktor-faktor tekanan lingkungan lainnya

Pengaruh Tidak Langsung :

1. Pencucian yang dipercepat terhadap zat dari organ daun
2. Peningkatan kerentanan terhadap kekeringan dan faktor-faktor tekanan lingkungan lainnya.
3. Gangguan pada asosiasi simbiosis
4. Gangguan pada hubungan timbal balik inang-parasit.

Dampak terhadap bahan lain selain tanaman, yaitu kerusakan yang dialami oleh bangunan yang bahan-bahannya seperti, batu kapur, batu pualam, dolomit yang akan dirusak oleh SO<sub>2</sub> dari udara. Efek dari kerusakan ini akan tampak pada penampilannya, integritas struktur, dan umur dari gedung tersebut. Dolomit, suatu mineral dalam bentuk garam rangkap dari kalsium-magnesium karbonat akan bereaksi dengan SO<sub>2</sub> udara sebagai berikut (Achmad, 2004) :



Selain pada tanaman dan pada bangunan, senyawa belerang ini juga mengancam kehidupan di air (*aquatic ecosystem*). Hujan dan salju yang mengandung senyawa itu akan membawanya ke tanah, sungai, daun, dan kolam. Organisme yang hidup dalam air akan mati jika pH terlalu rendah di bawah 4,0. Ikan salmon akan mati jika pH air turun sampai 5,5 (Sastrawijaya, 2009).

## 6.7 Dampak Kesehatan Pencemaran SO<sub>2</sub>

Sistem Pemantauan Lingkungan Global yang disponsori PBB memperkirakan bahwa pada Tahun 1987, dua pertiga penduduk kota hidup di kota-kota yang konsentrasi *sulfur dioksida* di udara sekitarnya di atas atau tepat pada ambang batas yang ditetapkan WHO. Gas yang berbau tajam tapi tak berwarna ini dapat menimbulkan serangan asma dan, karena gas ini menetap di udara, bereaksi dan membentuk partikel-partikel halus dan zat asam (KLH, 2010). Pengaruh SO<sub>2</sub> pada manusia telah banyak diperbincangkan dalam kalangan kedokteran. Jika konsentrasi SO<sub>2</sub> naik, orang mulai merasa terganggu. Kadar 6 bpj SO<sub>2</sub> akan melupuhkan dan merusak organ pernafasan. Karena itu kadar SO<sub>2</sub> di udara perlu dipantau secara berkala dan diumumkan ke masyarakat. Setiap kali kita bernafas, maka udara akan masuk dalam pipa kapiler dalam paru-paru yang amat luas, diduga 25 kali luas permukaan kulit kita. Setiap permukaan jaringan yang dilalui udara mengandung uap air yang mudah sekali bereaksi dengan SO<sub>2</sub> (Sastrawijaya, 2009).

Pada dasarnya, semua sulfur yang memasuki atmosfer dirubah dalam bentuk SO<sub>2</sub> dan hanya 1% atau 2% saja sebagai SO<sub>3</sub>. Walaupun SO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh aktivitas manusia hanya merupakan bagian kecil dari SO<sub>2</sub> yang ada di atmosfer menyebabkan iritasi saluran pernafasan dan kenaikan sekresi mucus. Orang yang mempunyai pernafasan lemah sangat peka terhadap kandungan SO<sub>2</sub> yang tinggi di atmosfer. Dengan konsentrasi 500 ppm, SO<sub>2</sub> dapat menyebabkan kematian pada manusia. Pencemaran yang cukup tinggi oleh SO<sub>2</sub> telah menimbulkan malapetaka yang cukup serius. Seperti yang terjadi di lembah Sungai Nerse Belgia pada 1930 tingkat kandungan SO<sub>2</sub> di udara mencapai 38 ppm dan menyebabkan toksisitas akut. Selama periode itu menyebabkan kematian 60 orang dan sejumlah ternak sapi mati. Hal yang sama beberapa tahun kemudian terjadi di Donov, Persylvania yang menyebabkan 20 orang meninggal. Yang paling mengerikan terjadi pada tahun 1952 di London, selama 5 hari terjadi perubahan temperatur dan

pembentukan kabut yang menyebabkan kematian antara 3500 sampai 4000 penduduk, peristiwa ini dikenal “*London Smog*” (kabut asap Kota London). Hasil autopsi menyatakan bahwa kematian disebabkan oleh iritasi saluran nafas (Achmad, 2004).

Efek pencemaran udara terhadap kesehatan manusia dapat terlihat baik secara cepat maupun lambat (Chandra, 2007) :

a. Efek Cepat

Hasil studi epidemiologi menunjukkan bahwa peningkatan mendadak kasus pencemaran juga akan meningkatkan angka kasus kesakitan dan kematian akibat penyakit saluran pernafasan.

b. Efek Lambat

Pencemaran udara diduga sebagai salah satu penyebab penyakit bronkhitis kronis dan kanker paru primer. Penyakit yang disebabkan oleh pencemaran udara, antara lain, emfisema paru, *black lung disease*, asbestosis, silikosis, bisinosis, dan pada anak-anak, penyakit asma dan eksema. Dimana mekanismenya, adalah perangsangan kuat terhadap kelenjar lendir, pernafasan dan mata. Pada konsentrasi tertentu dapat mengakibatkan sakit tenggorokan, batuk, sulit bernafas dan bronchitis serta kelumpuhan pernafasan (Susilawaty, 2009).

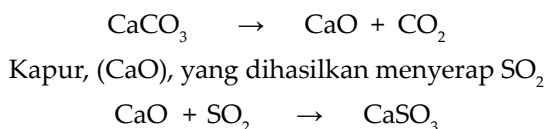
## 6.8 Upaya - Upaya Penurunan SO<sub>2</sub> Menuju Green City

Cara yang nyata untuk mengendalikan pencemaran udara adalah dengan mencegah pencemar memasuki atmosfer. Tidak ada cara untuk melakukan hal ini dengan sempurna. Semua kegiatan manusia menghasilkan limbah ; sebagian dari limbah ini dengan sendirinya memasuki udara. Meniadakan sama sekali semua kegiatan manusia tidak masuk akal, maka kita harus mencari cara penyingkirannya, yang menghasilkan pencemar berkadar rendah dan dapat diterima. (Neiburger, 1995).

Pemberantasan polusi SO<sub>2</sub> rupanya tidak mudah. Cerobong asap pabrik yang tinggi tidaklah memadai. Pembersihan batu bara sebelum

dibakar ternyata amatlah mahal. Sejumlah proses telah digunakan untuk menghilangkan SO<sub>2</sub> dari bahan bakar sebelum pembakaran dan dari gas-gas dalam cerobong asap setelah terjadi pembakaran. Teknik yang dilakukan adalah memisahkan partikel-partikel *pyrit* yang merupakan sumber dari SO<sub>2</sub> dan batu bara. Metode-metode kimia lainnya dapat juga dilakukan untuk menghilangkan belerang dan batu bara (Chandra, 2007).

Di Jepang, teknologi pengurangan pencemaran seperti “penggosok” (*flue gas desulfurizer/FGD*) cerobong asap yaitu perangkat yang dapat menghilangkan sampai 95% pencemaran gas sulfur dari gas cerobong asap dipasang pada pembangkit tenaga listrik di seluruh negeri. Perangkat ini mengurangi pengeluaran sulfur dioksida, suatu polutan yang tercipta ketika terjadi pembakaran bahan bakar yang mengandung sulfur seperti batubara dan minyak sampai hampir 40% antara tahun 1974 dan 1983, walaupun pada saat itu terjadi peningkatan ekonomi yang tajam (KLH, 2010). Sejumlah proses telah digunakan untuk menghilangkan belerang dioksida dari bahan bakar sebelum pembakaran dan dari gas-gas dalam cerobong asap setelah terjadi pembakaran. Teknik yang dilakukan adalah memisah-mishkan partikel-partikel *pyrit* yang merupakan sumber dari sulfur dioksida dan batu bara (Achmad, 2004). Proses yang dilakukan adalah membakar butiran-butiran batu bara dalam tempat yang dialasi butiran-butiran halus dari batu kapur atau dolomit dengan adanya aerasi. Panas akan memecah batu kapur (Achmad, 2004):

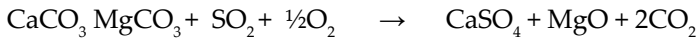


CaSO<sub>3</sub> yang dihasilkan dioksidasikan menjadi CaSO<sub>4</sub>

Banyak proses telah diusulkan untuk menghilangkan belerang dioksida dari cerobong asap melalui sistem *Scrubbing*. Proses ini meliputi



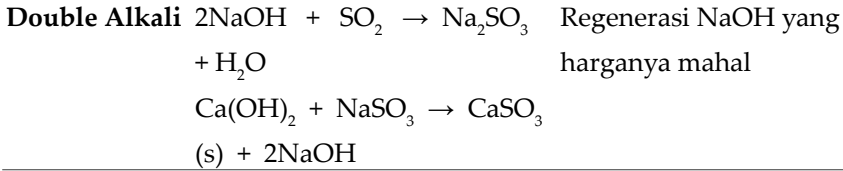
pembuangan dan pengambilan kembali (*recovery*) dalam sistem kering dan basah. Sistem pembuangan kering meliputi injeksi dari batu kapur atau dolomit kering ke dalam ketel uap, diikuti dengan recover dari kapur kering, sulfit, dan sulfat. Reaksi keseluruhan yang terjadi untuk dolomit (Achmad, 2004):



Kalsium padat dan magnesium oksida yang terbentuk dikeluarkan/dipindahkan dengan pengendapan elektrostatis atau alat pemisah “cyclone”. Proses ini hanya berhasil menghilangkan 50% dari SO<sub>2</sub> (Achmad, 2004)

**Tabel 5.2** Sistem *Scrubbing* Cerobong Asap

Proses	Reaksi Kimia	Keuntungan/ Kerugian
<b>Lime Slurry Scrubbing</b>	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	200 kg kapur dipakai per metric ton batu bara → pencemaran menumpuk
<b>Lime Stone Slurry Scrubbing</b>	$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_{2(g)}$	Tidak efisien, pH rendah
<b>Magnesium Oksida Scrubbing</b>	$\text{Mg(OH)}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MgSO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Pengabsorpsi tidak bisa diregenerasi
<b>Sodium Base Scrubbing</b>	$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow 2\text{NaHSO}_3$ $2\text{NaHSO}_3 + \text{Panas} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$	Biaya mahal regenerasi SO <sub>2</sub>



Berikut ini beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengurangi dan mengontrol emisi Sulfur Dioksida menuju Green City adalah : (EPA, 2010).

- Penggunaan bahan bakar bersulfur rendah
- Substitusi sumber energi lainnya untuk bahan pembakaran
- Penghilangan sulfur dari bahan bakar sebelum pembakaran
- Penghilangan  $\text{SO}_2$  dari gas buangan

Penggunaan bahan bakar bersulfur rendah mungkin dilakukan tetapi harganya lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar bersulfur tinggi. Sebagai contoh : penggunaan batu arang bersulfur rendah lebih mahal daripada batu arang bersulfur tinggi karena panas yang dikandungnya lebih rendah sehingga bahan yang digunakan harus lebih banyak jumlahnya, akibatnya biaya transportasi juga lebih mahal. Penghilangan  $\text{SO}_2$  dari gas buang merupakan salah satu cara mengatasi polusi udara. Salah satu cara adalah dengan menyuntikkan batu kapur ke dalam zona pembakaran, sehingga bereaksi dengan  $\text{SO}_x$  membentuk garam sulfat.

Efisiensi pengurangan atau penghilangan  $\text{SO}_2$  sebanyak 90% dapat tercapai dengan mengalirkan gas tersebut melalui larutan kapur. Masalah utama dalam sistem ini adalah terbentuknya bahan buangan yang cukup tinggi dalam bentuk  $\text{CaSO}_4$  padat, batu kapur yang tidak bereaksi dan abu, yang harus dibuang. Cara lainnya untuk mengurangi  $\text{SO}_2$  dari gas buangan adalah menggunakan reaksi antara ion bisulfit (dari  $\text{SO}_2$ ) dengan ion sitrat. Gas buangan mula-mula didinginkan sampai suhu  $50^\circ\text{C}$  atau kurang serta dibersihkan dari partikel dan sisa  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kemudian dialirkan ke dalam

menara absorpsi dan mengalami kontak dengan larutan yang mengandung ion sitrat (Fardiaz, 1992).

Larutan yang mengandung kompleks bisulfit-sitrat kemudian dialirkan ke dalam ruang tertutup yang disuntikkan hidrogen sulfide. Sulfur akan mengendap dan kemudian dilelehkan dan dihilangkan dari lautan tersebut. Larutan sitrat yang terbentuk kembali disirkulasi untuk penghilangan  $\text{SO}_2$  selanjutnya dan sebagian sulfur yang terendap diubah menjadi  $\text{H}_2\text{S}$  yang digunakan dalam proses. Dengan metode ini, dapat dihilangkan sebanyak 99% gas  $\text{SO}_2$  dari gas buangan. Pada beberapa industri peleburan baja digunakan sistem oksidasi katalitik untuk mengubah gas  $\text{SO}_2$  menjadi larutan asam sulfat yang agak kuat (75-80%). Gas dilewatkan melalui suatu katalis dan melalui beberapa kondenser untuk memproduksi asam. Pada beberapa industri, asam yang dihasilkan dapat digunakan sendiri, tetapi pada industri lainnya asam yang dihasilkan harus dijual. Karena pabrik peleburan baja biasanya terletak di tempat yang jauh terpisah, maka masalah yang timbul adalah dalam biaya transportasi asam yang diproduksi tersebut.

Adapun secara umum, rekomendasi program pengendalian pencemaran udara (termasuk pengendalian  $\text{SO}_2$ ) yang dapat dilakukan untuk mewujudkan *Green City*, bertumpu pada :

1. Upaya Pencegahan
2. Penanggulangan Pencemaran Udara
3. Pemulihan Mutu Udara

Upaya Pengendalian Pencemaran Udara, berdasarkan periode waktunya, terbagi menjadi dua (Chandra, 2007):

1. Jangka Pendek
  - a. Sosialisasi melalui media cetak dan elektronik berkaitan dengan bahaya pencemaran udara bagi kelangsungan hidup manusia dan perubahan ekosistem.
  - b. Relokasi kawasan industri yang berada di tengah kota ke daerah pinggiran kota

- c. *Dilution* yaitu upaya untuk mengencerkan bahan pencemar. Upaya ini dapat berlangsung secara alami dengan membangun daerah-daerah hijau (*green belt*). Daerah hijau tersebut merupakan suatu kawasan yang ditanami dengan tumbuhan yang rindang dan ditempatkan di antara lokasi permukiman dan kawasan industri.
  - d. *Containment* atau upaya penanggulangan untuk mencegah masuknya gas-gas toksik secara langsung ke dalam udara bebas. Dilakukan dengan memasang saringan atau filter pada alat pembuangan agar konsentrasi gas yang keluar masih berada dalam batas baku mutu emisi yang diperbolehkan dan tidak mengganggu kesehatan.
  - e. Penyelenggaraan analisis dampak lingkungan (Amdal) secara rutin di pabrik-pabrik yang berada di tengah kota atau di dekat lokasi permukiman penduduk.
  - f. Penyelenggaraan uji emisi gas buangan dari kendaraan bermotor secara berkala dan pembentukan sistem pemantauan pencemaran udara di setiap sudut kota.
  - g. Perbaikan sarana transportasi darat terutama armada angkutan kota agar lebih manusiawi (aman, nyaman, dan murah) sehingga dapat mengurangi penggunaan kendaraan pribadi.
  - h. Penerapan program *3 in 1* pada kendaraan pribadi selama jam-jam sibuk, terutama di jalan-jalan protokol di pusat kota.
2. Jangka Panjang
- a. Perencanaan tata ruang kota yang mengacu pada wawasan kesehatan lingkungan untuk memperbaiki kondisi udara yang sudah tercemar.
  - b. *Replacement* adalah mengganti perlengkapan dan sumber energi yang banyak mengakibatkan pencemaran dengan yang perlengkapan dan sumber energi yang kurang mengakibatkan pencemaran atau mengganti bahan bakar untuk industri dan

- kendaraan bermotor dengan bahan bakar yang ramah lingkungan, misalnya bahan bakar gas dan biosolar yang berasal dari minyak kelapa sawit, dan bahan bakar lainnya yang merupakan hasil inovasi dari berbagai kalangan (akademisi, umum, peneliti, dll)
- c. Membangun sarana transportasi perkotaan dengan mempergunakan kereta api bawah tanah (*subway station*) atau *bus way* serta kendaraan umum lainnya yang bisa mengurangi pemakaian kendaraan pribadi, seperti diketahui bersama jika penggunaan kendaraan pribadi berpotensi besar meningkatkan jumlah polutan di udara
  - d. Melakukan penghijauan atau membuat taman di setiap sudut kota (menambah jumlah ruang terbuka hijau, yang saat ini sudah sangat minim tergeser ruko dan mal).
  - e. Menegakkan penerapan atau aplikasi peraturan dan perundang-undang di lapangan khususnya untuk peraturan-peraturan lingkup daerah dan tetap dipayungi dengan peraturan tingkat nasional, seperti : Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

## Daftar Pustaka

- Achmad, R. 2004. *Kimia Lingkungan*. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Achmadi, Umar. 2011. *Dasar-Dasar Penyakit Berbasis Lingkungan*. Rajawali Press – Divisi Buku Perguruan Tinggi. Jakarta.
- Amqam, H., Djaffar, M.H., 2006. *Buku Ajar Pencemaran Udara*. Jurusan Kesehatan Lingkungan. Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Chandra, B. 2007. *Pengantar Kesehatan Lingkungan*. EGC. Jakarta.
- Connell, D., Miller, G. 2006. *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*. A. Wiley-Interscience Publication. Australia.

- Cunningham, P., Cunningham, M. 2004. *Principles of Environmental Science : Inquiry and Applications, Second Edition*. The Mc Graw- Hill Companies, Inc. United States.
- Fardiaz, Srikandi. 1992. *Polusi Air dan Udara*. Kanisius. Yogyakarta.
- Hill, M. 2004. *Understanding Environmental Pollution. Second Edition*. Cambridge University Press.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. 2010. *Pengendalian Pencemaran Udara*. KLH. Jakarta.
- Kusmaningrum, N. dan Gunawan, 2008. *Polusi Udara Akibat Aktivitas Kendaraan Bermotor Di Jalan Perkotaan Pulau Jawa Dan Bali*. Puslitbang Jalan. Hal 1. Bandung.
- Leighton, P. 1971. *Photochemistry of Air Pollution*. Academic Press, Inc. United States of America.
- Mallongi, A.; Stang S.; Astuti, R.D.P.; Rauf, A.U.; Natsir M.F., (2023). Risk assessment of fine particulate matter exposure attributed to the presence of the cement industry. *Global J. Environ. Sci.Manage.*, 9(1): 1-16.
- Neely, R, et. Al. 2013. *Recent Anthropogenic Increases in SO<sub>2</sub> from Asia Have Minimal Impact on Stratospheric Aerosol*. American Geophysical Union, Geophysical Research Letters, Vol. 40, 999–1004, available@ <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50263>.
- Neiburger, M., Edinger, J. 1995. *Understanding our Atmospheric Environment*. W.H. Freeman and Company. United States and Oxford.
- Porteous, A. 1981. *Developments in Environmental Control and Public Health-2*. Applied Science Publisher LTD. London
- Sastrawijaya, T. 2009. *Pencemaran Lingkungan*. Rineka Cipta. Jakarta.
- Seinfeld, J. , Pandis, P. 2006. *Atmospheric Chemistry and Physic* . John Wiley and Sons, Inc. Canada.

- Soedomo, M. 2001. *Pencemaran Udara*. Penerbit ITB. Bandung.
- Susilawaty, A., La Ane, R., 2009. *Analisis Kualitas Udara Ambient Kota Makassar*. Jurnal Kesehatan Volume II No. 4 Tahun 2009.
- US Environmental Protection Agency (EPA). 2012. *EPA Defines Air Pollution Danger Levels*. Available @<http://www2.epa.gov/aboutepa/epa-defines-air-pollution-danger-levels>, diakses tanggal 11 Desember 2014.
- US Environmental Protection Agency (EPA). 2010. *Final Regulatory Impact Analysis (RIA) for the SO<sub>2</sub> National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. Office of Air Quality Planning and Standards Health and Environmental Impact Division Air Benefit-Cost Group Research Triangle Park, North Carolina.
- Zulkifli. 2011. *Kerusakan Struktur, Morfologi dan Biokimia Tanaman sebagai Bio Indikator Penurunan Kualitas Udara Perkotaan*. Majalah Ilmiah Sriwijaya, Volume XVIII, No. 11, April 2011. ISSN 0126-4680.

# BAB 7

## **DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP LINGKUNGAN DAN KESEHATAN DI WILAYAH PESISIR**

### **7.1 Pendahuluan**

Perubahan iklim telah memberikan efek yang sangat nyata. Hal ini terlihat sejak 1982 hingga 2012 dimana dari tiga dekade tersebut secara berturut-turut suhu permukaan bumi lebih hangat. Rata-rata suhu total permukaan tanah dan laut secara global telah mengalami peningkatan sebesar 0,85 °C selama periode 1880 hingga 2012 (IPCC, 2014). Indonesia merupakan salah satu Negara berkembang yang tidak hanya berkontribusi terhadap terjadinya perubahan iklim namun juga sangat rentan terkena dampak akibat permasalahan lingkungan tersebut. Perubahan iklim terutama berdampak pada kehidupan masyarakat yang sangat menggantungkan hidupnya pada alam baik di daratan dan perairan. Dalam Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim, Badan Perencanaan Pembangunan Nasional Republik Indonesia (2014) menyatakan bahwa sector kelautan dan perikanan pesisir termasuk dalam sektor-sektor utama yang terkena dampak dari bahaya iklim.

Wilayah pesisir merupakan salah satu wilayah yang paling rentan terkena berbagai dampak perubahan iklim. Dampak tersebut diantaranya



berupa kenaikan muka air laut, perubahan keasaman air laut, peningkatan frekuensi dan intensitas terjadinya iklim ekstrim, dan perubahan suhu permukaan air laut. Peningkatan suhu permukaan laut akan mengubah kondisi ekosistem perairan. Kejadian ini tentu berpengaruh terhadap keanekaragaman hayati laut dan berdampak besar bagi sektor perikanan. Terganggunya ekosistem wilayah pesisir akan menurunkan pendapatan masyarakat yang berpengaruh pada berkurangnya tingkat kesejahteraan terutama nelayan. Suku Bajau yang umumnya bekerja sebagai nelayan telah merasakan dampak perubahan iklim terhadap mata pencaharian mereka. Perubahan iklim berpengaruh pada kepastian waktu melaut, perubahan lokasi penangkapan serta berkurangnya jumlah hasil tangkapan nelayan.

Lingkungan pesisir merupakan lingkungan yang sangat dinamis dengan berbagai penggunaan lahan yang sangat kompleks (Marfai dan King, 2008a; Aerts et al, 2009; Marfai 2011). Indonesia sebagai Negara kepulauan mempunyai daerah pesisir yang sangat strategis yang dapat dioptimalkan untuk mendukung pelaksanaan pembangunan. Banyak perkotaan dan kawasan strategis di Indonesia yang terletak di kawasan pesisir, seperti Jakarta, Semarang, dan Surabaya (Marfai dan King, 2008b; Ward et al, 2010). Namun demikian, disisi lain, kawasan pesisir juga merupakan kawasan yang sangat rawan untuk terkena bencana. Salah satu bencana yang terjadi di kawasan pesisir adalah bencana banjir (Mardiatno, 2007; Blackett dan Hume, 2007). Banjir kawasan pesisir (rob) dimasa yang akan datang dapat menjadi semakin besar dengan adanya fenomena kenaikan muka air laut akibat pemanasan global. Naiknya muka air laut (*sea level rise*) merupakan salah satu permasalahan penting yang harus dihadapi oleh negara-negara pantai atau negara kepulauan di dunia (Kobayashi, 2003). IPCC (2007) menyebutkan bahwa kenaikan muka air laut di dunia pada Tahun 2100 akan bertambah sekitar 18 cm sampai dengan 59 cm. Hal ini berarti pertambahan kenaikan muka air laut akan berkisar antara 0,21 cm/tahun sampai dengan 0,68 cm/tahun, atau dengan rerata sekitar 0,44 cm/tahun. Maka diketahui bahwa kenaikan muka air laut di Jakarta adalah sekitar 0,69 cm/tahun. Hasil

pengukuran yang hampir sama disampaikan oleh Purnama, dkk (2009) yang menyatakan bahwa kenaikan muka air laut di Jakarta adalah sekitar 0,60 cm/tahun. Fenomena alam ini perlu diperhitungkan dalam semua kegiatan pengelolaan wilayah pesisir (Christanto, 2010, Mardiatno dkk, 2007b). Naiknya suhu air permukaan laut akan diikuti oleh pemuaian massa air laut. Fenomena tersebut, dikombinasikan dengan kontribusi mencairnya lapisan es, menyebabkan percepatan naiknya kedudukan muka air laut atau *sea-level rise* (IPCC, 2001; Kumar, 2006; Prihatno, 2011).

Perubahan iklim (*climate change*) merupakan salah satu isu global yang sangat penting sejak diadakannya Konferensi Tingkat Tinggi Bumi di Rio de Janeiro tahun 1992. Konvensi Perubahan Iklim atau UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) merupakan salah satu agenda dalam dokumen Agenda 21. Maksud dan tujuan utama dari konvensi tersebut adalah untuk menjaga kesta-bilan konsentrasi gas rumah kaca (*greenhouse gases*) di atmosfer, sehingga terjamin ketersediaan pangan dan pembangunan berkelanjutan (*sus-tainable development*). Sebagai Negara kepulauan dengan jumlah pulau sekitar 17.500 dan memiliki garis pantai sepanjang 81.000 km serta banyaknya penduduk yang tinggal di daerah pesisir pantai, Indonesia adalah negara yang sangat rawan terhadap perubahan iklim. Sebagai gambaran untuk periode 2003–2005 saja, telah terjadi 1.429 kejadian bencana dan sekitar 53,3% adalah bencana terkait dengan hidrometeo-ologi. Banjir adalah bencana yang paling sering terjadi (34%), diikuti oleh longsor (16%). Begitu pula data kejadian bencana yang dicatat dalam OFDA/CRED *International Disaster Database* tahun 2007, menunjukkan sepuluh kejadian terbesar di Indonesia yang terjadi selama periode tahun 1907 hingga 2007 sebagian besar merupakan bencana yang terkait dengan iklim (*hydrometeorological related disasters*), antara lain banjir, kekeringan, keba-karan hutan, dan ledakan hama/ penyakit. Hal ini menunjukkan bahwa kejadian bencana terkait dengan aspek iklim mengalami peningkatan frekuensi dan intensitasnya.

Dalam laporan Bank Dunia (2010) yang berjudul "Natural Hazards, Unnatural Disasters" disebutkan bahwa bencana alam akibat iklim ini terjadi di hampir semua belahan dunia, bahkan cukup mengejutkan di Asia hampir 80% kejadian bencana alam dipengaruhi oleh iklim. Pemanasan global yang menjadi isu internasional ternyata membawa konsekuensi yang sangat serius antara lain munculnya kejadian hujan ekstrim, variabilitas curah hujan (dan perubahan iklim yang sedang berlangsung saat ini. Akibat perubahan iklim inilah timbul berbagai gejala seperti ketidakpastian musim hujan dan kemarau, meningkatnya frekuensi hujan dan intensitasnya, meningkatnya frekuensi dan meluasnya kejadian bencana alam terutama yang berkaitan dengan aspek hidrometeorologis. Begitu luasnya dampak perubahan iklim terhadap berbagai aspek kehidupan manusia termasuk dampaknya terhadap kesehatan masyarakat sehingga diperlukan langkah-langkah pengendalian, penanggulangan dan adaptasi yang komprehensif sehingga dampak yang lebih buruk bisa dihindari. Tulisan ini sedikit memberikan gambaran tentang perubahan iklim dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat serta beberapa metode pengukurannya.

## 7.2 Perubahan Iklim Global

Dalam tatanan teoritis, perubahan iklim mengacu pada setiap perubahan yang signifikan dalam pengukuran iklim seperti suhu curah hujan atau angin yang berlangsung untuk jangka waktu yang panjang (satu dekade atau lebih). Perubahan iklim dapat disebabkan oleh faktor alami (seperti perubahan intensitas matahari atau terjadi perlambatan orbit bumi dalam mengelilingi matahari), proses alami dalam sistem iklim (misalnya perubahan dalam sirkulasi air laut), kegiatan manusia yang mengubah komposisi atmosfer (misalnya melalui pembakaran bahan bakar fosil) dan perubahan permukaan tanah (misalnya pengundulan hutan, reboisasi, urbanisasi, penggurunan dan lain-lain). Sementara itu dalam kerangka praktis perubahan iklim secara khusus ditekankan pada adanya perubahan

pada iklim yang disebabkan secara langsung maupun tidak langsung oleh kegiatan manusia yang mengubah komposisi atmosfer global dan juga terhadap variabilitas iklim alami yang diamati selama periode waktu tertentu

Diposaptono *et al.* (2009) menyebutkan bahwa perubahan iklim mengakibatkan perubahan fisik lingkungan di wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil antara lain intrusi air laut ke darat, gelombang pasang, banjir, kekeringan, genangan di lahan rendah, dan erosi pantai. IPCC (2007) menyebutkan bahwa setidaknya terdapat dua factor penyebab kerentanan wilayah pesisir, faktor pertama adalah pemanasan global ditengarai meningkatkan frekuensi badai di wilayah pesisir dan faktor kedua adalah pemanasan global diperkirakan akan meningkatkan suhu air laut antara 1-3°C yang berakibat meningkatnya potensi kematian dan pemutihan terumbu karang di perairan tropis.

Iklim merupakan rata-rata cuaca atau kondisi cuaca yang berlangsung selama periode waktu yang panjang. Iklim berbicara tentang suhu rata-rata, curah hujan rata-rata dan intensitas kejadian badai yang terjadi di suatu wilayah dalam jangka waktu yang lama, bahkan hingga berabad-abad, terjadi secara alami dan rumit sebagai implikasi dari interaksi antara air, udara dan permukaan daratan (Stone, 2010) Keberadaan iklim menghasilkan suhu dan curah hujan yang memberi kehidupan bagi manusia, tumbuhan dan hewan. Dari masa ke masa iklim mengalami perubahan baik disebabkan oleh proses alami maupun aktivitas manusia. Perubahan iklim merupakan perubahan pola pada cuaca normal yang terjadi di seluruh dunia selama periode waktu yang cukup lama, yakni selama berpuluh-puluh tahun bahkan lebih dari itu (Stone, 2010) UU No.31 Tahun 2009 mendefinisikan perubahan iklim sebagai proses yang disebabkan, baik secara langsung maupun tidak langsung, oleh aktivitas manusia yang berakibat pada perubahan komposisi atmosfer secara global dan perubahan variabilitas iklim alamiah yang diamati dalam kurun waktu tertentu serta dapat dibandingkan. Secara umum, petani memahami perubahan iklim sebagai kejadian tidak tentu musim kemarau dan musim

hujan yang dapat mengganggu proses pola tanam dan mengancam hasil panen (Balitbang Pertanian, 2011). Pada pemanasan global (Las, 2011) Perkembangan pembangunan ekonomi terutama kegiatan industri yang berkembang pesat memberikan sumbangsih yang cukup besar terhadap keadaan iklim global.

Dari masa ke masa iklim mengalami perubahan baik disebabkan oleh proses alami maupun aktivitas manusia. Perubahan iklim merupakan perubahan pola pada cuaca normal yang terjadi di seluruh dunia selama periode waktu yang cukup lama, yakni selama berpuluh-puluh tahun bahkan lebih dari itu (Stone, 2010) UU No.31 Tahun 2009 mendefinisikan perubahan iklim sebagai proses yang disebabkan, baik secara langsung maupun tidak langsung, oleh aktivitas manusia yang berakibat pada perubahan komposisi atmosfer secara global dan perubahan variabilitas iklim alamiah yang diamati dalam kurun waktu tertentu serta dapat dibandingkan. Secara umum, petani memahami perubahan iklim sebagai kejadian tidak tentu musim kemarau dan musim hujan yang dapat mengganggu proses pola tanam dan mengancam hasil panen (Balitbang Pertanian, 2011) Kejadian perubahan iklim global ditandai dengan adanya peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, peningkatan kejadian cuaca ekstrem, permukaan air laut yang semakin meningkat dan mencairnya lapisan es di kutub (Stone, 2010) Perubahan iklim dipengaruhi oleh dua faktor, yakni faktor internal dan eksternal. Faktor internal merupakan proses interaksi alami antar gas-gas tak terlihat yang terjadi di atmosfer bumi. Sedangkan faktor eksternal merupakan pengaruh yang ditimbulkan oleh aktivitas manusia berupa gas-gas yang dapat mengganggu keseimbangan interaksi di atmosfer bumi.

Proses perubahan iklim secara alami disebabkan oleh fluktuasi radiasi matahari yang masuk ke bumi dan fenomena letusan gunung berapi. Pengaruh lain yang menyebabkan perubahan iklim baik yang terjadi saat ini maupun dimasa yang akan datang adalah aktivitas manusia (antropogenik). Berbagai aktivitas manusia menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca berupa karbondioksida (CO<sub>2</sub>), methana (CH<sub>4</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>2</sub>)

dan Chloroflourocarbons (CFCs) yang berimplikasi pada pemanasan global (Las, 2011) Perkembangan pembangunan ekonomi terutama kegiatan industri yang berkembang pesat memberikan sumbangsih yang cukup besar terhadap keadaan iklim global.

Lebih rinci, penyebab kenaikan suhu rata-rata global diakibatkan oleh peningkatan jenis gas tertentu di atmosfer bumi. Atmosfer merupakan lapisan udara pelindung bumi yang tersusun atas berbagai gas tak terlihat yakni oksigen (O<sub>2</sub>), nitrogen (N<sub>2</sub>), argon (Ar), karbondioksida (CO<sub>2</sub>), helium (He), neon (Ne), Ozon (O<sub>3</sub>), hydrogen (H<sub>2</sub>), krypton (Kr), metana (CH<sub>4</sub>) dan xenon (Xe). Dalam atmosfer bumi terjadi interaksi antar gas tertentu yang bekerja secara alami untuk menjaga suhu bumi, atau yang sering disebut dengan Gas Rumah Kaca (GRK).

### **7.3 Identifikasi Transport dan Transfer Akumulasi Bahan Pencemar**

Pemanasan Global adalah isu lingkungan hidup yang mengakibatkan perubahan iklim yang terjadi aktivitas manusia dalam pemanfaatan dan pengolahan sumberdaya alam (*renewable, non-renewable*). Pemanasan global ditandai dengan naiknya suhu permukaan bumi yang disebabkan oleh peningkatan gas emisi gas rumah kaca, yang disebabkan oleh:

1. Pemanfaatan energi tidak efisien
2. Pencemaran udara akibat industry
3. Penggunaan bahan bakar tidak ramah lingkungan pada transportasi
4. Persampahan
5. Pengelolaan lingkungan tidak maksimal
6. Penggunaan bhn tidk ramah Ozon pada AC dan kulkas

Proses perubahan iklim secara alami disebabkan oleh fluktuasi radiasi matahari yang masuk ke bumi dan fenomena letusan gunung berapi. Pengaruh lain yang menyebabkan perubahan iklim baik yang terjadi saat ini

maupun dimasa yang akan datang adalah aktivitas manusia (antropogenik). Berbagai aktivitas manusia menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca berupa karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_2$ ) dan Chloroflourocarbons (CFCs) yang berimplikasi. Perubahan iklim adalah berubahnya kondisi fisik atmosfer bumi, antara lain suhu dan distribusi curah hujan, yang membawa dampak luas terhadap berbagai sektor kehidupan manusia dan terjadi dalam kurun waktu yang panjang (Gernowo & Yulianto, 2010). Berubahnya iklim berpengaruh terhadap berubahnya aspek lingkungan perairan, termasuk suhu, oksigenasi, keasaman, salinitas dan kekeruhan laut, danau dan sungai, kedalaman dan arus perairan dalam, sirkulasi arus laut, dan berkembangnya penyakit air, parasit dan melimpahnya ganggang beracun (FAO, 2015).

Gas rumah kaca dengan kadar yang tepat akan menjaga bumi berada pada suhu yang hangat untuk mendukung kehidupan makhluk hidup didalamnya. Namun, aktivitas manusia menghasilkan berbagai gas yang dapat mengganggu proses alami tersebut sehingga menyebabkan lebih banyak panas yang terjebak dalam bumi dan akhirnya suhu bumi menjadi meningkat. Hampir setiap aktivitas manusia melepaskan gas karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) ke udara, bahkan sebagian besar dari aktivitas tersebut menghasilkan gas  $\text{CO}_2$  dalam jumlah besar, yakni dari pembakaran bahan bakar fosil oleh industri, asap kendaraan dan pembakaran hutan (Stone, 2010).

Emisi dari degradasi hutan mencapai 5,3 miliar ton carbon pertahun akibat perubahan tata guna lahan dan kerusakan hutan (salah satunya akibat dari kebakaran hutan. Sedangkan emisi bersumber dari deforestasi dapat diekuivalen dengan emisi 600 juta mobil, 400 juta sepeda motor ratusan ribu pesawat terbang. Kerusakan hutan juga dapat mengakibatkan hancurnya keragaman hayati yang tinggal di hutan dan juga masyarakat sekitar hutan yang seringkali menimbulkan konflik horizontal antara masyarakat dan pelaku usaha. Oleh karena itu lahir *Program Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* (REDD). Kesepakatan dalam Conference of Parties (COP 13 Des 2007 di Bali. COP 16, 2010 di Mexico) ruang lingkup

REDD mendorong Indonesia untuk menyiapkan berbagai aturan yang terkait dengan 4 hal yaitu:

1. Mengurangi deforestasi dan degradasi hutan;
2. Masalah hak atas tanah (*tenurial arrangements*);
3. Struktur pengelolaan hutan (*forest governance*);
4. Partisipasi pemangku kepentingan yang efektif terutama peranan masyarakat adat dan masyarakat.

Berubahnya kondisi fisik atmosfer bumi, suhu dan distribusi curah hujan, kemudian membawa dampak luas terhadap perubahan aspek lingkungan perairan, termasuk suhu, oksigenasi, keasaman, salinitas dan kekeruhan laut, danau dan sungai, kedalaman dan arus perairan dalam, sirkulasi arus laut, dan berkembangnya penyakit air, parasit dan melimpahnya ganggang beracun (FAO, 2015). Salah satu sektor yang rentan menerima dampak perubahan iklim adalah sektor perikanan. Diposaptono *et al.* (2009) menyebutkan bahwa perubahan iklim mengakibatkan perubahan fisik lingkungan di wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil antara lain intrusi air laut ke darat, gelombang pasang, banjir, kekeringan, genangan di lahan rendah, dan erosi pantai. IPCC (2007) menyebutkan bahwa setidaknya terdapat dua faktor penyebab kerentanan wilayah pesisir, faktor pertama adalah pemanasan global ditengarai meningkatkan frekuensi badai di wilayah pesisir dan faktor kedua adalah pemanasan global diperkirakan akan meningkatkan suhu air laut antara 1-3°C yang berakibat meningkatnya potensi kematian dan pemutihan terumbu karang di perairan tropis.

#### **7.4 Dampak pada Lingkungan**

Lingkungan dan Nelayan adalah dua entitas yang saling bergantung satu sama lain. nelayan selama ini memanfaatkan lingkungan laut dan kekayaan alam sekitarnya untuk bertahan hidup, sedangkan lingkungan kelestariannya juga bergantung dari kepedulian nelayan dan masyarakat



pesisir untuk selalu mempertahankannya. Soegiarto memaknai daerah pesisir Indonesia dengan; daerah pertemuan antara darat dan laut; ke arah darat wilayah pesisir meliputi bagian daratan, baik kering maupun terendam air, yang masih dipengaruhi sifat-sifat laut seperti pasang surut, angin laut, dan perembesan air asin; sedangkan ke arah laut wilayah pesisir mencakup bagian laut yang masih dipengaruhi oleh proses-proses alami yang terjadi di darat seperti sedimentasi dan aliran air tawar, maupun yang disebabkan oleh kegiatan manusia di darat seperti penggundulan dan pencemaran (Dahuri, 1996).

Efek yang ditimbulkan dari adanya perubahan iklim adalah perubahan musim kemarau menjadi kemarau basah. Dampak dari kejadian perubahan iklim terhadap wilayah pulau-pulau kecil dapat terjadi secara langsung dan tidak langsung. Meningkatnya suhu berdampak meningkatnya suhu air dan menyebabkan tinggi muka air laut semakin meningkat. Dalam mengantisipasi dampak perubahan iklim, diperlukan penataan ruang wilayah pulau-pulau kecil. Hal ini bertujuan agar masyarakat wilayah pulau-pulau kecil dapat beradaptasi dengan wilayah mereka yang rentan terhadap resiko bencana akibat dari dampak perubahan iklim. Penataan ruang wilayah pulau-pulau kecil seharusnya menyajikan informasi geospasial terpadu hulu-tengah-hilir dalam kurun waktu tertentu agar dapat digunakan sebagai analisis penataan ruang dan proyeksi di masa mendatang. Dampak bencana dan perubahan iklim di wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil yang ada saat ini lebih banyak disebabkan oleh berbagai aktivitas manusia.

Banyak penduduk yang sangat bergantung pada kekayaan laut Indonesia untuk kehidupan mereka. penduduk tersebut dikenal dengan masyarakat pesisir. Masyarakat pesisir adalah sekelompok warga yang tinggal di wilayah pesisir yang hidup bersama dan memenuhi kebutuhan hidupnya dari sumber daya di wilayah pesisir. Masyarakat yang hidup di kota-kota atau permukiman pesisir memiliki karakteristik secara sosial ekonomis sangat terkait dengan sumber perekonomian dari wilayah laut.

Survei Sosial dan Ekonomi Nasional tahun 2013 mencatat bahwa hanya 2,2% rumah tangga di Indonesia yang memiliki kepala rumah tangga berprofesi sebagai nelayan. Jumlahnya sekitar 1,4 juta kepala rumah tangga nelayan. Rata-rata jumlah anggota rumah tangga di Indonesia sekitar 4 orang, maknanya sekitar 5,6 juta penduduk Indonesia yang kehidupannya bergantung kepada kepala rumah tangga yang berprofesi sebagai nelayan. Untuk Rata-rata pendapatan nelayan dari hasil tangkapan di laut, sekitar Rp 28,08 juta/tahun, lebih kecil dibandingkan pendapatan pembudi daya ikan di perairan umum dan di tambak yang mencapai Rp 34,80 juta/tahun dan Rp 31,32 juta/tahun. Kondisi sosial dan ekonomi nelayan di Indonesia yang memprihatinkan tidak terlepas dari pola kemiskinan dan ketidakpastian ekonomi terlebih saat ini, nelayan dihadapkan dengan ancaman perubahan iklim. Laporan *Food and Agriculture Organization of The United Nation (FAO)* tahun 2015 menyebutkan bahwa kekeringan, banjir, badai dan bencana lain yang dipicu oleh perubahan iklim telah meningkat dalam frekuensi dan tingkat keparahan selama tiga dekade terakhir (<http://www.antaraneews.com>) Dalam penjelasannya, FAO memaparkan bahwa petani, nelayan, peternak skala kecil dari Myanmar hingga ke Guatemala, dan dari Vanuatu ke Malawi, telah melihat mata pencaharian mereka terkikis atau terhapus oleh badai, kekeringan, banjir dan gempa bumi (FAO, 2015).

Efek dari perubahan iklim juga dirasakan di Indonesia. Salah satu contoh bentuk ancaman perubahan iklim yakni fenomena El Nino yang melanda di beberapa daerah dan berakibat pada kerentanan di sektor pangan. Faktor perubahan iklim yang terjadi di Indonesia, tidak saja berdampak pada sektor pertanian, namun juga akan berdampak pada sektor perikanan, dan yang paling rentan akibat perubahan iklim yakni profesi nelayan. Kerentanan ini bukan saja kerentanan atas sektor pangan, namun perubahan iklim juga berdampak pada kenaikan permukaan air laut berdampak luas terhadap aktivitas budi daya di wilayah pesisir. Naiknya permukaan air laut menggenangi wilayah pesisir sehingga akan menghancurkan tambak-tambak ikan di Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi

(UNDP, 2007). Fakta kemiskinan nelayan akibat pendapatan yang kecil dibandingkan dengan pengeluarannya ditambah faktor perubahan iklim menjadikan nelayan semakin memperhatikan kondisi sosial dan ekonomi.

Salah satu contoh lain dampak perubahan iklim adalah pada Isu lingkungan hidup di Sumatera Utara tertumpu pada kerusakan hutan mangrove, penebangan bakau dan alih fungsi lahan. Berdasarkan penelitian Syamsul Arifin dengan judul “Peranan Dan Fungsi Hukum Lingkungan Mengantisipasi Dampak Perubahan Iklim Pada Sumberdaya Pesisir Sumatera Utara.” Terdapatnya lahan kritis yang tandus mencapai 199,700 Ha dalam kawasan hutan (5.63 % dari 3.545.773 Ha luas hutan) dan 594. 158 Ha di lahan budi daya (8,29 % dari 7.168.084 Ha luas daerah). Kerusakan mangrove dan alih fungsi lahan pesisir pantai semakin banyak. Hanya 36, 1% hutan mangrove yang masih baik. Dampak lingkungan dari kondisi tersebut adalah banjir bandang semakin sering dan iklim mikro berubah.

## 7.5 Dampak Kesehatan dan Penyakit

Dampak perubahan iklim terhadap kesehatan masyarakat kejadiannya sangat bervariasi dan berbeda di setiap daerah. Namun secara umum berbagai gangguan atau penyakit yang dapat muncul adalah sebagai berikut.

1. Infeksi saluran pernafasan dan alergi saluran pernafasan Alergi pada saluran pernafasan dan penyakit infeksi saluran pernafasan kemungkinan akan meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah dan waktu paparan penduduk terhadap debu (dari kekeringan), polusi udara, racun aero-sol dari laut dan peningkatan jumlah serbuk sari dari tanaman akibat perubahan pola pertumbuhan. Kanker Potensi bahaya lainnya yang bersifat langsung dari perubahan iklim adalah peningkatan jumlah kejadian kanker, hal berhubungan dengan peningkatan paparan bahan kimia beracun penyebab kanker yang berasal dari penguapan berbagai bahan kimia tersebut. Dalam kasus peningkatan curah hujan atau banjir, kemungkinan terjadi peningkatan

bahan kimia dalam proses mencuci dan kontamisasi air oleh logam berat.

2. Efek langsung lainnya kejadian kanker disebabkan karena penipisan stratosfer ozon yang akan mengakibatkan peningkatan durasi dan intensitas radiasi ultraviolet (UV), dan hal ini meningkatkan risiko kanker kulit dan katarak. Penyakit Kardiovaskular dan Stroke Perubahan iklim dapat memperburuk penyakit jantung yang sudah ada, hal ini disebabkan meningkatnya tekanan panas, meningkatnya beban tubuh akibat peningkatan partikulat udara dan perubahan distribusi vektor penyakit menular yang berhubungan dengan penyakit kardiovaskuler. Berbagai penelitian telah membuktikan adanya hubungan antara paparan gelombang panas, cuaca yang ekstrim dan perubahan kualitas udara dengan peningkatan penyakit kardiovaskuler. Paparan suhu panas sering memperberat penyakit stroke sedangkan paparan suhu dingin dapat menyebabkan disritmia. Penurunan kualitas udara akibat perubahan konsentrasi ozon dapat memperberat beban kerja jantung dan mengganggu perkukaran gas dalam proses pernafasan, sedangkan peningkatan jumlah partikulat diudara sering dihubungkan dengan gangguan koagulasi, thrombosis dan infark miokardium.
3. Foodborne Disease dan ketersediaan bahan pangan Perubahan iklim dapat memengaruhi ketersediaan bahan pangan pokok, kekurangan gizi, dan kontamisasi makanan oleh zat-zat berbahaya (seperti kontaminan kimia, mikroba pathogen, biotoksin dan pestisida). Perubahan iklim dapat mempercepat kerusakan bahan makanan dan memperberat serangan hama tanaman (seperti kutu daun dan belalang). Kematian dan Penyakit yang disebabkan paparan panas Perubahan iklim dapat meningkatkan mortalitas dan morbiditas penyakit yang disebabkan paparan panas. Faktor host seperti usia dan penyakit lain yang diderita seperti penyakit jantung dan diabetes mellitus dapat memperberat dampak dari tekanan panas. Dalam kondisi natural, sama seperti binatang, manusia bisa bertahan pada

suhu 10-350C, tanpa kesulitan berarti. Tetapi pada suhu diatas 400C, maka sebagian manusia, khususnya anak-anak dan orang berusia lanjut, mulai mengalami kesulitan. Suhu tinggi yang disertai kelembaban rendah me-nyebabkan mudahnya terjadi keku-rangan air dalam tubuh (dehidrasi). Dehidrasi dapat menimbulkan berbagai gangguan fungsi temporer sampai permanen, tergantung lamanya dehi-drasi terjadi, dampak paling buruk dari paparan panas adalah kematian karena suhu terlalu panas (heat stroke). G

4. Gangguan tumbuh kembang anak Dua konsekuensi penting dari perubahan iklim yang akan mempengaruhi tumbuh kembang anak adalah : gizi buruk khususnya selama periode prenatal dan anak usia dini sebagai akibat dari penurunan pasokan makanan, dan peningkatan paparan kontaminan beracun dan biotoksin aki-bat dari peristiwa cuaca ekstrim dan peningkatan pestisida yang digunakan untuk produksi pangan. Gangguan mental Perpindahan penduduk akibat bencana, kerusakan atau kehilangan properti, kehilangan orang yang di-cintai, dan stres kronis, adalah sebagian dari dampak negatif perubahan iklim yang mempengaruhi kesehatan men-tal. Deteksi dini, identifikasi populasi yang rentan dan pengembangan jaringan monitoring migrasi penduduk dapat membantu dalam menye-diakan dukungan perawatan kesehatan yang tepat.
5. Penyakit Syaraf Perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan pertumbuhan alga ber-bahaya (Harmful algal blooms /HABs), HABs dan mikroorganisme laut lainnya menghasilkan biotoksin yang bersifat neurotoksin pada manusia. Dalam kondisi normal, biotoksin yang dihasilkan HABs dan mikroorganisme laut lainnya akan disaring dan terakumulasi dalam tiram, kerang dan remis. Namun demikian seiring dengan meningkatnya jumlah biotoksin maka jumlah yang tersaring dan terakumulasi menjadi terbatas. Hal yang terpenting adalah identifikasi dan pemeriksaan makanan laut sebelum sampai ke konsumen.

6. Vectorborne and zoonotic diseases (VBZD) VBZD adalah penyakit infeksi yang ditularkan melalui hewan atau vektor penyakit. Kecepatan pertumbuhan dan penyebaran VBZD sangat dipengaruhi iklim. Perubahan iklim dapat mengakibatkan perluasan wilayah penyebaran sumber /vektor penyakit, pemendekan masa inkubasi patogen (seperti malaria, demam berdarah, dan ensefalitis) dan meningkatkan potensi penularan pada manusia. Penyakit yang ditularkan melalui air Peningkatan suhu air, frekuensi curah hujan dan tingkat penguapan serta perubahan dalam ekosistem pesisir dapat meningkatkan kejadian kontaminasi air dengan zat patogen berbahaya dan bahan kimia berbahaya lain, sehingga paparan pada manusia meningkat. Peningkatan curah hujan di suatu wilayah dapat mempercepat penyebaran penyakit dan dapat mengganggu penyediaan air bersih. Populasi yang Berisiko Dampak perubahan iklim tidak dirasakan merata oleh semua populasi, hal ini dikarenakan kondisi perubahan iklim berbeda antara daerah satu dengan daerah lainnya. Sebagai contoh peristiwa tekanan panas akan lebih terasa berat jika dialami oleh daerah yang sudah terbiasa dengan curah hujan tinggi, begitu sebaliknya. Begitu pula kerentanan untuk mengalami gangguan kesehatan akibat perubahan iklim antar individu berbeda-beda. Pemahaman akan hal ini sangat berguna dalam menyusun skenario pencegahan dampak perubahan iklim terhadap kesehatan masyarakat terutama dalam membuat urutan prioritas penanganan masalah. Sebagai contoh, populasi penduduk dengan tingkat penghasilan yang rendah dan tingkat pendidikan rendah akan lebih rentan untuk mengalami dampak yang lebih berat jika dibandingkan dengan penduduk dengan penghasilan menengah ke atas.
7. Fakta lain diuraikan oleh peneliti Bangladesh yang menyebutkan bahwa kasus measles berhubungan dengan suhu rata-rata tahunan maksimum di Bangladesh. Hasil penelitian lain menyebutkan bahwa banyak wabah penyakit menular yang diakibatkan berubahnya iklim seperti

suhu, curah hujan dan kelembaban, termasuk hasil studi di Anhui Province di mana HFM, malaria, influenza, demam tipoid, meningitis dan schistosomiasis terpengaruh oleh suhu, sedangkan perubahan kelembaban absolut berpengaruh terhadap disentri, demam berdarah, hepatitis A, hemorrhagic fever, typhoid fever, malaria, meningitis, influenza and schistosomiasis

## 7.6 Model Penanganan yang Diaplikasikan

Perubahan iklim sudah terjadi dan menjadi isu global dan dampaknya sudah mulai dirasakan oleh manusia termasuk di sektor kesehatan. Terdapat dua hal yang harus dilakukan untuk menghadapi perubahan iklim yaitu adaptasi dan mitigasi, Pendekatan mitigasi merupakan upaya-upaya yang dilakukan untuk mengurangi bencana dari sumbernya. Pendekatan adaptasi merupakan upaya untuk mengatasi perubahan iklim baik sifatnya reaktif maupun antisipatif. Adaptasi adalah usaha penyesuaian aktivitas manusia dan teknologi terhadap fenomena anomali iklim yang disebabkan oleh pemanasan global (Balitang pertanian, 2011) Adaptasi perubahan iklim juga dapat diartikan sebagai upaya penyesuaian terhadap dinamika iklim khususnya penyesuaian pada aktivitas ekonomi yang termasuk dalam sektor-sektor rentan (Murniningtyas, 2011)

Pendekatan ini sifatnya mengaktifkan dampak akibat terjadinya perubahan iklim, yaitu dengan melakukan proses penyesuaian diri dengan kondisi perubahan iklim yang ada. Kedua pendekatan diatas secara umum memiliki perbedaan, pendekatan mitigasi lebih menitik beratkan pada upaya-upaya untuk mengurangi terjadinya perubahan iklim melalui tindakan-tindakan preventif seperti meminimalisasi limbah industri, menggerakkan kegiatan-kegiatan yang ramah lingkungan (Awuor, 2009). Sedangkan pendekatan adaptasi lebih menekankan pada penyesuaian-penyesuaian terhadap perubahan yang terjadi karena dampak perubahan iklim. Pendekatan ini dilakukan untuk mempertahankan eksistensi dan

kehidupan wilayah pesisir, khususnya permukiman yang ada didalamnya (McGranahan, 2007; Awuor, 2009).

Serangkaian adaptasi dan mitigasi diperlukan untuk menghadapi perubahan iklim. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) mendefinisikan mitigasi sebagai serangkaian usaha intrusi manusia dalam menekan sumber emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang menjadi penyebab pemanasan global. Adaptasi merupakan usaha penanggulangan perubahan iklim dengan penyesuaian yang benar, baik dengan meminimalisir dampak negatif maupun memanfaatkan dampak positif dari perubahan iklim (UNDP, 2007).

Berdasarkan penelitian Heru Setiawan dengan judul “Strategi Coping Masyarakat Pulau Kecil. Dalam Menghadapi Dampak Perubahan Iklim” mengungkapkan bahwa Perubahan ekologis pada ekosistem pesisir akibat terjadinya perubahan iklim merupakan fenomena alam yang tidak dapat dihindari. Agar dapat bertahan terhadap dampak dari perubahan iklim, masyarakat melakukan berbagai strategi coping. Strategi coping dilakukan masyarakat sebagai bentuk tindakan pertahanan dan penyesuaian dalam mengurangi kerentanan sesuai dengan skala tertentu seperti komunitas, region atau kawasan dan selanjutnya pada tingkat nasional. Berdasarkan hasil wawancara dengan responden, secara umum masyarakat tidak mengetahui bahwa fenomena perubahan alam yang telah mereka rasakan seperti semakin seringnya terjadi gelombang pasang dan angin kencang, semakin berkurangnya hasil tangkapan ikan, berkurangnya sumber air bersih, semakin seringnya banjir rob yang melanda pemukiman, abrasi di pemukiman dan tambak, daerah tangkapan ikan yang berubah dan berubahnya musim tangkap merupakan dampak terjadinya perubahan iklim.

Perubahan pola angin, menyebabkan terjadinya kekacauan angin sehingga di beberapa kasus, angin barat berhembus di periode seharusnya berhembus angin timur menyebabkan meningkatnya intensitas dan frekuensi gelombang badai di lautan dan pesisir (Rahmasari, 2011). Perubahan



ekologi yang mereka rasakan merupakan proses yang terjadi dalam waktu yang lama. Oleh karena itu, diperluka edukasi berkaitan dengan ancaman terjadinya perubahan iklim bagi komunitas nelayan karena mereka adalah kelompok yang sangat rentan menerima dampak perubahan iklim.

Strategi coping ekonomi ditujukan untuk meningkatkan pendapatan keluarga dan menyimpannya dalam bentuk tabungan atau harta (bergerak maupun tidak bergerak). Tujuan diterapkannya strategi ini adalah ketika mereka tidak melaut akibat adanya musim gelombang pasang, mereka mempunyai cadangan uang untuk bertahan memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari. Beberapa bentuk strategi coping ekonomi ini diantaranya adalah menerapkan berbagai alat dan teknik penangkapan ikan dan memperbanyak alternatif sumber pendapatan. Beberapa strategi coping yang bersifat struktural yang dilakukan masyarakat diantaranya adalah : (a) Membangun tanggul dari beton yang bertujuan untuk melindungi pemukiman dan tambak dari hempasan ombak dan bahaya abrasi; (b) Memperkokoh struktur bangunan rumah dengan menggunakan beton dan membatasi bagian bangunan yang berbatasan dengan laut lepas dengan menggunakan beton; (c) Membangun fasilitas air bersih untuk mengantisipasi kekurangan air bersih di musim kemarau; (d) Merehabilitasi area tambak yang sudah tidak produktif dengan melakukan penanaman mangrove yang dilakukan baik secara individu maupun berkelompok. Strategi coping yang bersifat structural lebih menekankan pada usaha yang bersifat kelompok, dan dengan bantuan dari pihak lain, baik dari pemerintah maupun organisasi non-pemerintah. Beberapa contoh bantuan dari pemerintah adalah fasilitas air bersih, pembuatan tanggul dan rehabilitasi kawasan bakau, sementara bantuan dari lembaga non-pemerintah diantaranya adalah rehabilitasi kawasan tambak yang tidak produktif dengan mangrove dan pendampingan dalam pembentukan kelompok-kelompok masyarakat.

Pada tanggal 3 Oktober 2009 Pemerintah Republik Indonesia mengesahkan dan mengundang Undang-Undang Nomor 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Pada

point menimbanginya, diuraikan bahwa pemanasan global yang semakin meningkat mengakibatkan perubahan iklim sehingga memperparah penurunan kualitas lingkungan hidup karena itu perlu dilakukan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup adalah upaya sistematis dan terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan dan penegakan hukum.

Terdapat beberapa Pasal dari Undang-Undang Nomor 32 tahun 2009 yang berhubungan dengan perubahan iklim, Pasal 57 ayat (1) huruf c dan ayat 4, yang menetapkan, pemeliharaan lingkungan hidup dilakukan upaya pelestarian fungsi atmosfer, meliputi: upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, upaya perlindungan ozon, dan upaya perlindungan terhadap hujan asam. Selanjutnya Pasal 63 ayat (1) huruf j pemerintah bertugas dan berwenang menetapkan dan melaksanakan kebijakan mengenai pengendalian dampak perubahan iklim dan perlindungan emisi. Ayat (2) huruf e, pemerintah provinsi bertugas dan berwenang menyelenggarakan inventarisasi sumber daya alam dan emisi gas rumah kaca pada tingkat provinsi, sedangkan untuk pemerintah kabupaten/kota ditetapkan dalam ayat (3) huruf e.

Pemanfaatan laut oleh masyarakat pesisir juga dapat dilakukan dengan cara berbeda-beda antar wilayah pantai satu dengan yang lain yang disesuaikan dengan tipologi pesisir. Dengan memperhatikan profil fisik pesisir/pantai, maka tipe wilayah pantai berdasarkan morfologi dan dinamika perairannya secara garis besar dapat diklasifikasikan ke dalam lima jenis.

Adapun keterkaitan tipologi pesisir dengan pemanfaatannya adalah sebagai berikut: (1) Pantai dengan Tipe-A pada umumnya dimanfaatkan untuk pembangunan pelabuhan dengan tambahan fasilitas-fasilitas pelayanan jasa dan perdagangan; kota tepian pantai (water front city);

pengembangan ekoturisme yang sesuai seperti ski air, naik perahu layar atau motor, dan lainnya. (2) Pantai dengan Tipe-B pada umumnya dimanfaatkan untuk water front city; kawasan industri; permukiman; ekoturisme; dapat pula dimanfaatkan untuk pelabuhan, tetapi memerlukan dermaga yang panjang untuk menjangkau kedalaman laut yang cukup untuk kapal bertambat; dan marikultur. (3) Pantai dengan Tipe-C umumnya dimanfaatkan untuk konservasi hutan bakau atau hutan pantai, pengembangan ekoturisme berupa penikmatan penjelajahan hutan konservasi dan melihat flora dan fauna; pengembangan budidaya air payau di belakang jalur hijau; pengembangan permukiman di belakang usaha budidaya, dan pengembangan budidaya laut. (4) Pantai dengan Tipe-D pada umumnya dimanfaatkan untuk budidaya air payau; hutan rawa pantai; pengembangan ekoturisme penikmatan penjelajahan hutan pantai dan melihat flora fauna langka; pengembangan permukiman di belakang kegiatan ekoturisme. (5) Pantai dengan Tipe-E pada umumnya dimanfaatkan untuk pelabuhan tetapi dengan rekayasa penahan air (break water) yang lebih panjang untuk membuat kolam pelabuhan yang lebih luas; pengembangan ekoturisme memancing, berselancar angin, naik perahu layar, dan lainnya; pengembangan permukiman di belakang kegiatan ekoturisme.

## 7.7 Potensi Hambatan dan Keberhasilan

Salah satu bentuk hambatan dalam penggunaan metode coding adalah Beberapa pilihan strategi coping masyarakat dalam menghadapi perubahan iklim menyebabkan menurunnya kualitas lingkungan ekosistem pesisir, diantaranya adalah kerusakan terumbu karang dan ekosistem mangrove. Sekalipun demikian, Strategi coping ekonomi dilakukan dengan memperbanyak alternatif sumber pendapatan, menerapkan berbagai teknik penangkapan ikan dan meningkatkan kerjasama sosial ekonomi. Strategi coping struktural dilakukan dengan membuat tanggul pelindung dan penanaman mangrove guna mencegah banjir rob akibat gelombang

pasang. Strategi coping yang bersifat sosial dilakukan dengan membentuk kelompok-kelompok masyarakat, dan strategi coping kultural dilakukan dengan menjaga hutan mangrove dengan aturan adat.

Sedangkan dalam proses mitigasi dan adaptasi, sebelum dua hal ini dilakukan perlu dilakukan penilaian kerentanan terhadap perubahan iklim di sektor kesehatan. Sehingga rumusan baik adaptasi maupun mitigasi yang dilakukan adalah sesuai dengan keadaan sebenarnya serta tepat sasaran. Namun kedua solusi ini akan sulit diterapkan apabila tidak diedukasikan secara merata kepada masyarakat.

## Daftar Pustaka

- Ade Panca Zulrizkan<sup>1</sup>, Hayati Sari Hasibuan<sup>2</sup>, Dan Raldi Hendrotoro Koestoer<sup>2</sup>. 2017. *Peran Informasi Geospasial Dalam Mendukung Penataan Ruang Wilayah Pulau-Pulau Kecil Berbasis Adaptasi Perubahan Iklim Kajian Di Pulau Harapan Dan Pulau Kelapa*, Kabupaten. Magister Sekolah Ilmu Lingkungan, Salemba 4, Universitas Indonesia<sup>1</sup> Sekolah Ilmu Lingkungan, Salemba 4, Universitas Indonesia<sup>2</sup>
- Andrian Ramadhan Dan Rani Hafsaridewi. 2012. *Dampak Perubahan Lingkungan Terhadap Perkembangan Aktivitas Ekonomi Dan Kesejahteraan Masyarakat Pesisir Di Kawasan Segara Anakan*. J. Sosek Kp Vol. 7 No. 1 Tahun 2012
- Anilia Ratnasari. 2016. *Penggunaan Video Visual Lingkungan Pesisir Indramayu Dengan Pendekatan Contextual Teaching And Learning Terhadap Penguasaan Konsep Perubahan Iklim Pada Siswa*. U Nnes Journal Of Biology Education 5 (1) (2016): 85-9
- Christopher Mulanda Aura, Safina Musa, Melckzedek K. Osore, Edward Kimani, Victor Mwakha Alati, Nina Wambiji, George W. Maina, Harrison Charo-Karisa. 2016. *Quantification Of Climate Change*

*Implications For Water-Based Management: A Case Study Of Oyster Suitability Sites Occurrence Model Along The Kenya Coast.* Journal Of Marine System S0924-7963(16)30290-1

- Djoko Santoso Abi Suroso, Tri Wahyu Hadi, Hamzah Latief, Dan Edi Riawan. 2011. *Pola Kerentanan Pesisir Indonesia Terhadap Dampak Perubahan Iklim Sebagai Basis Perencanaan Adaptasi.* Jurnal Tata Loka; Volume 13; Nomor 2; Mei 2011 © 2011 Biro Penerbit Planologi Undip.
- Elisaveta P. Petkova 1,\*, Kristie L. Ebi 2, Derrin Culp 1 And Irwin Redlener. 2015. *Climate Change And Health On The U.S. Gulf Coast: Public Health Adaptation Is Needed To Address Future Risks.* International Journal Of Environmental Research And Public Health Issn 1660-4601 Wwww.Mdpi.Com/Journal/Ijerp
- Ford, J. D1,2, Couture, N3, Bell, T4, Clark, D. G1. 2018. *Climate Change And Canada's North Coast: Research Trends, Progress, An 1 D Future Directions.* Environmental Reviews, 26 (1). Pp. 82-92. Issn 1181-8700
- Heru Stiawan. 2016. *Strategi Coping Masyarakat Pulau Kecil Dalam Menghadapi Dampak Perubahan Iklim. Prosiding Seminar Nasional Geografi Ums 2016 Upaya Pengurangan Risiko Bencana Terkait Perubahan Iklim* Isbn: 978-602-361-044-0
- Iwan M Ramdan. No Year. *Perubahan Iklim, Dampak Terhadap Kesehatan Masyarakat Dan Metode Pengukurannya.* Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Mulawarman.
- Li H. Erikson1, Patrick L. Barnard1, Andrea O'neill1, Patrick Limber1, Sean Vitousek1, Juliette Finzi-Hart1, Maya Hayden2, Jeanne Jones1, Nathan Wood1, Michael Fitzgibbon2, Amy Foxgrover1, Jessica Lovering1. 2018. *Assessing And Communicating The Impacts Of Climate Change On The Southern California Coast.* California Natural Resources Agency Ccca4-Cnra-2018-013

- Mallongi A, Natsir MF, Dwi R, Astuti P, Rauf AU, Rachmat M, Muhith A. 2020. Potential ecological risks of mercury contamination along communities area in tonasa cement industry Pangkep, Indonesia?. *Enferm Clin.* 30:119–122.
- Mallongi, A.; Stang S.; Astuti, R.D.P.; Rauf, A.U.; Natsir M.F., (2023). Risk assessment of fine particulate matter exposure attributed to the presence of the cement industry. *Global J. Environ. Sci.Manage.*, 9(1): 1-16.
- Nazmul Huq 1,\* , Jean Hugé 2, Emmanuel Boon 3 And Animesh K. Gain 4. 2015. *Climate Change Impacts In Agricultural Communities In Rural Areas Of Coastal Bangladesh: A Tale Of Many Stories*. *Sustainability* 2015, 7, 8437-8460; Doi:10.3390/Su7078437
- Rauf, A.U.; Mallongi, A.; Lee, K.; Daud, A.; Hatta, M.; Al Madhoun, W.; Astuti, R.D.P. Potentially Toxic Element Levels in Atmospheric Particulates and Health Risk Estimation around Industrial Areas of Maros, Indonesia. *Toxics* 2021, 9, 328. <https://doi.org/10.3390/toxics9120328>
- R. C. De Winter<sup>1</sup> · B. G. Ruessink<sup>1</sup>. 2017. *Sensitivity Analysis Of Climate Change Impacts On Dune Erosion: Case Study For The Dutch Holland Coast*. *Climatic Change* Doi 10.1007/S10584-017-1922-3
- Russell C. Babcock<sup>1,2\*</sup>, Rodrigo H. Bustamante<sup>1</sup>, Elizabeth A. Fulton<sup>3</sup>, Derek J. Fulton<sup>3</sup>, Michael D. E. Haywood<sup>1</sup>, Alistair James Hobday<sup>3</sup>, Robert Kenyon<sup>1</sup>, Richard James Matear<sup>3</sup>, Eva E. Plagányi<sup>1</sup>, Anthony J. Richardson<sup>1,4</sup> And Mathew A. Vanderklift<sup>3,5</sup>. 2019. *Severe Continental-Scale Impacts Of Climate Change Are Happening Now: Extreme Climate Events Impact Marine Habitat Forming Communities Along 45% Of Australia's Coast*. Original Research Published: 24 July 2019 Doi: 10.3389/Fmars.2019.00411

- Roshanka Ranasinghe. 2016. *Assessing Climate Change Impacts On Open Sandy Coasts: A Review*. *Earth Science Reviews* (2016), S0012-8252(16)30196-9
- Satria Dewiyanti\*, Amar Ma'ruf, Dan Lies Indriyani. 2019. *Adaptasi Nelayan Bajau Terhadap Dampak Perubahan Iklim Di Pesisir Soropia Kabupaten Konawe, Sulawesi Tenggara*. *Ecogreen* Vol. 5 No. 1, April 2019 Halaman 23 – 29 Issn 2407 – 9049
- Silvia Serrao-Neumanna,B,®, Gemma Schuchb, Melanie Coxb, Darryl Low Choyb. 2019. *Scenario Planning For Climate Change Adaptation For Natural Resource Management: Insights From The Australian East Coast Cluster*. *Ecosystem Services* 38 (2019) 100967.
- Syedabdolhossein Mehvara,B,®, Tatiana Filatovac,D, Motaleb Hossain Sarkere, Ali Dastgheibb, Roshanka Ranasinghea,. 2019. *Climate Change-Driven Losses In Ecosystem Services Of Coastal Wetlands: A Case Study In The West Coast Of Bangladesh*.
- Syamsul Arifin. 2015. *Peranan Dan Fungsi Hukum Lingkungan Mengantisipasi Dampak Perubahan Iklim Pada Sumberdaya Pesisir Sumatera Utara*. *Jurnal Hukum Samudra Keadilan* Vol. 10 No. 2 Juli-Desember 2015
- Sulistiyawati. 2015. *Dampak Perubahan Iklim Pada Penyakit Menular: Sebuah Kajian Literatur*. *Jurnal Kesehatan Masyarakat* Vol 08/No.01/Maret/2015
- Sunarti1, Nur Khasanah Apriliasari. 2015. *Dampak Perubahan Iklim Terhadap Permukiman Pesisir Di Kelurahan Demaan Kabupaten Jepara*. Biro Penerbit Planologi Undip P Issn 0852-7458- E Issn 2356-0266
- Taufik Akbar1), Mi'rojul Huda2). 2017. *Nelayan, Lingkungan, Dan Perubahan Iklim (Studi Terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Pesisir Di Kabupaten Malang)*. *Wahana* Issn 0853-4404