

TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN DAN INDUSTRI

Dwi Astuti, Arina Nuraliza Romas, Karina Mutia Safera,
Muh Taufiqurrahman, Ayusti Dirga, Rahmawati, Darsini,
Abdullah Muamar, Windi Wulandari, Ilham Rahmatullah,

TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN DAN INDUSTRI

**Dwi Astuti
Arina Nuraliza Romas
Karina Mutia Safera
Muh Taufiqurrahman
Ayusti Dirga
Rahmawati
Darsini
Abdullah Muamar
Windi Wulandari
Ilham Rahmatullah**



PT GLOBAL EKSEKUTIF TEKNOLOGI

TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN DAN INDUSTRI

Penulis:

Dwi Astuti
Arina Nuraliza Romas
Karina Mutia Safera
Muh Taufiqurrahman
Ayusti Dirga
Rahmawati
Darsini
Abdullah Muamar
Windi Wulandari
Ilham Rahmatullah

ISBN: 978-623-198-145-5

Editor: Dr. Neila Sulung, N.S., S.Pd., M.Kes.

Mila Sari, M.Si.

Penyunting: Yuliatr Novita, M.Hum.

Desain Sampul dan Tata Letak: Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penerbit: PT GLOBAL EKSEKUTIF TEKNOLOGI

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi: Jl. Pasir Sebelah No. 30 RT 002 RW 001
Kelurahan Pasie Nan Tigo Kecamatan Koto Tengah
Padang Sumatera Barat

website: www.globaleksekutifteknologi.co.id

email: globaleksekutifteknologi@gmail.com

Cetakan Pertama, Maret 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur dan rahmat Allah SWT, atas berkah hidayah dan ridho-NYA yang telah memberikan kekuatan kepada penulis sehingga buku dengan judul Toksikologi Lingkungan dan Industri ini dapat diterbitkan sesuai yang diharapkan. Buku ini berisi tentang konsep dasar toksikologi lingkungan dan industri, klasifikasi toksikan, konsep dosis respon dalam toksikologi, interaksi zat dalam fase eksposisi, toksokinetik, toksidinamik, dampak senyawa pencemar di lingkungan biotik dan abiotik, berbagai bentuk toksisitas di udara dan penyebarannya, kualitas udara ambien, toksikologi logam berat, toksisitas pestisida, paparan.

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada semua pihak yang telah berperan aktif dalam membantu menyusun dan menerbitkan buku ini, kepada editor, korektor, dan penerbit tanpa bantuan mereka sulit rasanya buku ini sampai ke tangan pembaca. Terakhir, sebagai karya manusia biasa penulis menyadari karya ini masih kurang dari kesempurnaan. Oleh karenanya kami sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif dari para pembaca yang budiman. Diatas segalanya dan dengan penuh kerendahan hati, buku ini penulis hantarkan ke hadapan para pembaca. Dengan harapan semoga bermanfaat adanya.

Padang, Maret 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL.....	vii
BAB 1 KONSEP DASAR TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN DAN INDUSTRI ...	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Pengertian Toksikologi dan Racun	2
1.3 Toksisitas.....	6
1.4 Klasifikasi Toksin/Racun	7
1.4.1 Klasifikasi berdasarkan sumber:	8
1.4.3 Klasifikasi berdasarkan sifat fisik dan kimia.....	9
DAFTAR PUSTAKA.....	12
BAB 2 KLASIFIKASI TOKSIKAN	13
2.1 Pendahuluan.....	13
2.2 Pengantar Toksikan	15
2.3 Klasifikasi Toksikan	17
DAFTAR PUSTAKA.....	26
BAB 3 KONSEP DOSIS RESPON DALAM TOKSIKOLOGI.....	27
3.1 Pendahuluan.....	27
3.2 Dosis dan Respon	29
3.2.1 Dosis	29
3.2.2 Respon.....	30
3.3 Dosis Toksikologi	31
3.3.1 LD50.....	31
3.3.2 NOAEL (<i>No Observed Adverse Effect Level</i>)	32
3.3.2 LOAEL (<i>Lowest Observed Adverse Effect Level</i>).....	32
3.4 Rute Paparan	33
3.5 Organ Sasaran.....	34
3.5.1 Organ Hati	35
3.5.2 Organ Ginjal	36
DAFTAR PUSTAKA.....	38
BAB 4 INTERAKSI ZAT DALAM FASE EKSPOSISI, TOKSOKINETIK, TOKSIDINAMIK.....	39
4.1 Pendahuluan.....	39
4.2 Fase Eksposisi.....	40
4.2.1 Eksposis Melalui Kulit.....	43
4.2.2 Eksposis Melalui jalur Inhalasi	44
4.3 Fase Toksikokinetik.....	46

4.3.1 Absorpsi	47
4.3.2 Distribusi.....	49
4.3.3 Metabolisme	50
4.3.4 Ekskresi	52
4.4.1 Antagonisme.....	55
4.4.2 Sinergisme.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	58
BAB 5 DAMPAK SENYAWA PENCEMAR DI LINGKUNGAN BIOTIK	
DAN ABIOTIK.....	59
5.1 Pendahuluan.....	59
5.2 Lingkungan Biotik dan Abiotik.....	60
5.2.1 Komponen Biotik.....	60
5.2.2 Komponen Abiotik.....	62
5.3 Dampak Pencemaran Terhadap Lingkungan	62
5.3.1 Pencemaran Udara	64
5.3.2 Pencemaran Tanah.....	68
5.3.3 Pencemaran Air	71
DAFTAR PUSTAKA.....	75
BAB 6 BERBAGAI BENTUK TOKSISITAS DI UDARA DAN	
PENYEBARANNYA.....	77
6.1 Pendahuluan.....	77
6.2 Sumber Toksisitas Di Udara.....	80
6.2.1 Sumber Alamiah.....	81
6.3 Jenis-Jenis Toksisitas Di Udara.....	84
6.4 Parameter Toksisitas di Udara dan Penyebarannya	87
6.4.1 Partikulat (PM)	87
6.4.2 Karbon Monoksida (CO)	91
6.4.3 Nitrogen Oksida (NO _x)	96
6.4.4 Sulfur Oksida (SO _x)	100
6.4.5 Oksidan Fotokimia.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....	105
BAB 7 KUALITAS UDARA AMBIEN.....	107
7.1 Pengantar.....	107
7.2 Standar Kualitas Udara Ambien.....	109
7.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kualitas Udara Udara	111
7.3.1 Partikulat.....	111
7.3.2 Karbon Monoksida (CO)	113
7.3.3 Nitrogen oksida.....	114
7.3.4 Sulfur dioksida.....	115
7.3.5 Hidrokarbon (HC)	116

7.3.6 Oksidan Fotokimia	117
7.4 Ambang Batas Kualitas Udara	118
7.5 Penyebab dan Upaya Mencegah Pencemaran Udara	119
DAFTAR PUSTAKA.....	122
BAB 8 TOKSIKOLOGI LOGAM BERAT	123
8.1 Pendahuluan.....	123
8.2 Logam Berat.....	125
8.3 Toksisitas Berilium (Be).....	126
8.4 Toksisitas Timbal (Pb)	128
8.5 Toksisitas Aluminium (Al)	131
8.6 Toksisitas Kadmium (Cd)	132
8.7 Toksisitas Arsen (As).....	133
8.7 Toksisitas Merkuri / Raksa (Hg).....	135
DAFTAR PUSTAKA.....	137
BAB 9 TOKSISITAS PESTISIDA.....	141
9.1 Pengertian Pestisida	141
9.2 Toksisitas Pestisida Sintetik	145
9.3 Biopestisida toksik terhadap hama tapi ramah lingkungan.....	152
BAB 10 TOKSIKOLOGI BAHAN TAMBAHAN PANGAN.....	163
10.1 Pendahuluan	163
10.2 Bahan Tambahan Pangan (BTP).....	164
10.2.1 Golongan dan jenis Bahan Tambahan Pangan.....	165
10.2.2 Batas Maksimal Penggunaan Bahan Tambahan Pangan.....	168
10.3 Toksikologi Bahan Tambahan Pangan.....	171
10.3.1 Pemanis.....	172
10.3.2 Pewarna.....	172
10.3.3 Antikempal	174
10.3.4 Pengawet.....	174
DAFTAR PUSTAKA.....	176
BAB 11 PAPARAN.....	179
11.1 Pendahuluan	179
11.2 Karakteristik Paparan.....	180
11.3 Aliran Toksikan dalam Lingkungan	186
DAFTAR PUSTAKA.....	188
DAFTAR PUSTAKA.....	170
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Kurva Dosis Respon.....	33
Gambar 3.2. Rute Paparan.....	34
Gambar 4.1. Fase toksodinamik.....	40
Gambar 5.1. Siklus Bahan Pencemar dalam Lingkungan biotik dan abiotik	64
Gambar 5.2. Ilustrasi Pencemaran udara yang bersumber dari Industri.....	65
Gambar 5.3. Keberadaan sampah domestik sebagai sumber pencemaran	69
Gambar 5.4. Pencemaran air akibat sampah domestik	71
Gambar 5.5. Efek Residu yang terbawa oleh air pada ekosistem.....	72
Gambar 6.1. Sumber Polusi Udara.....	84
Gambar 6.2. Deposisi Kompartemen Partikulat di dalam Tubuh	91
Gambar 6.3. Gas CO Menggantikan Posisi Oksigen dalam Darah	94
Gambar 8.1 Jenis Logam	123
Gambar 8.2. Jenis Logam Berat.....	124
Gambar 8.3 Sifat Fisika Logam Berat Secara Umum.....	125
Gambar 8.4 Sifat Kimia Logam Berat Secara Umum.....	126
Gambar 8.5 Bahaya Berilium (Be)	127
Gambar 8.6 Sifat Berilium (Be) Secara Umum.....	128
Gambar 8.7 Sifat Timbal (Pb) Secara Umum.....	129
Gambar 8.8 Sifat Aluminium Secara Umum.....	131
Gambar 8.9 Sifat Kadmium (Cd) Secara Umum	133
Gambar 8.10 Sifat Arsen (As) Secara Umum.....	134
Gambar 8.12 Sifat Merkuri (Hg) Secara Umum.....	136
Gambar 9.1. Keracunan pestisida Akut di beberapa Negara.....	142
Gambar 9.2. Proses stimulasi hormon tiroid dan umpan balik	147

Gambar 9.2. Mekanisme kerja Organogosfat pada reseptor AChE	149
Gambar 9.3. reseptor muscarinic dan reseptor nikotinik	150
Gambar 9.4. Beberapa tumbuhan yang dapat dijadikan biopeptisida	153
Gambar 11.1. Penggunaan APD untuk mencegah terjadinya paparan	181
Gambar 11.2. Jalur masuk paparan ke dalam tubuh dan tempat pemaparannya	183
Gambar 11.3. Industri	185

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Simpul pemantauan toksika.....	16
Tabel 2.2. Organ sasaran toksikan.....	18
Tabel 2.3. Klafisikasi Karsinogen.....	22
Tabel 2.4. Label pada B3.....	23
Tabel 3.1. Potensi toksik pada hewan uji coba.....	31
Tabel 5.1. Klasifikasi Umum dari Bahan Pencemar Air dan dampaknya	73
Tabel 6.1. Parameter Pencemar Udara.....	64
Tabel 6.2. Pengaruh Konsentrasi CO terhadap Kesehatan.....	95
Tabel 7.1. Standar Kualitas Udara Ambien Nasional.....	110
Tabel 7.2. Batas ambang untuk parameter polutan udara.....	118
Tabel 7.3. Kisaran Indeks Standar Polutan Udara.....	119
Tabel 9.1. Jenis-Jenis pestisida berdasarkan sasaran penggunaannya.....	143
Tabel 10.1. Batas maksimal penambahan bahan tambahan pangan pewarna alami	168

BAB 1

KONSEP DASAR TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN DAN INDUSTRI

Oleh Dwi Astuti

1.1 Pendahuluan

Sejak peradaban manusia dalam mencari makanan berkembang, beraneka ragam bahan pangan dikonsumsi baik yang berasal dari botani, nabati, ataupun mineral. Di sini, makanan dapat dikategorikan sebagai bahan yang tidak berbahaya bagi tubuh jika dikonsumsi, memberikan manfaat, serta memang diperlukan keberadaannya di dalam tubuh agar organ tubuh dapat menjalankan fungsi-fungsinya. Sebaliknya, bahan yang membahayakan bagi tubuh dinyatakan sebagai racun.

Hal ini menunjukkan bahwa efek yang berbahaya akibat racun sudah dikenal oleh manusia sejak awal peradaban manusia. Tujuan toksikologi adalah untuk mengidentifikasi dan mempelajari mekanisme efek racun bahan kimia pada makhluk hidup, sehingga manusia dapat menggunakan dan hidup dengan zat beracun tanpa mengalami efek berbahaya seperti masalah kesehatan atau kerusakan lingkungan. Untuk mencapai tujuan tersebut, ruang lingkup studi toksikologi meliputi:

- mengidentifikasi, memahami, dan menentukan toksisitas inheren bahan kimia;
- Menilai risiko dan menilai efek bahan kimia;
- Mengidentifikasi sistem atau organ target/kritis yang terkena bahan kimia.

1.2 Pengertian Toksikologi dan Racun

Toksikologi awalnya didefinisikan sebagai "studi tentang racun". Istilah toksikologi berarti "ilmu tentang racun". Kata Bahasa Indonesia toksik adalah kata serapan yang berasal dari Bahasa Inggris 'toxic' dan digabungkan dengan 'logos'. Kata toxic sendiri berasal dari kata latin toxicus "poison" (racun). Asal usul kata tersebut berasal dari bahasa Yunani kuno toxicos, yang digunakan untuk anak panah yang diselupkan ke dalam racun. Oleh karena itu, toksikologi terkait dengan toxicos "busur" dan toxikon "warna panah", dua kata Latin yang digunakan di masa lalu ketika panah dalam perang mengandung racun (Klaassen, 2008).

Secara singkat, toksikologi merupakan ilmu tentang efek zat kimia yang berbahaya bagi organisme hidup. Toksikologi ini merupakan cabang farmakologi yang didefinisikan sebagai ilmu interaksi antara zat kimia dan organisme hidup. Menurut definisi ini, farmakologi tidak terbatas pada studi zat aktif dengan manfaat terapeutik, tetapi mencakup semua zat aktif biologis seperti racun, pestisida, insektisida, kosmetik dan komponen nutrisi (misalnya vitamin, asam amino, zat pewarna, pengikat).) dan pengawet) bila digunakan dengan cara atau dosis non-fisiologis. Zat asing yang masuk ke sistem tubuh

disebut xenobiotik. Jika suatu zat memiliki efek berbahaya bagi penggunaannya, zat tersebut diklasifikasikan sebagai racun.

Cakupan dari toksikologi sangat luas karena mengkaji tentang efek toksis "toksisitas" di segala bidang. Lu (1995) mengelompokkan toksikologi dalam empat bidang yakni: (1) bidang kedokteran untuk tujuan diagnostik, pencegahan, serta terapeutik; (2) bidang industri makanan sebagai zat tambahan pangan baik yang ditambahkan secara langsung maupun tidak langsung; (3) bidang pertanian sebagai bahan pestisida ataupun zat pengatur pertumbuhan tanaman, penyerbukan buatan, maupun zat tambahan pada makanan hewan; serta (4) bidang industri kimia sebagai bahan pelarut, sebagai komponen dasar dan bahan antara untuk plastik dan zat kimia lainnya.

Menurut Loomis (1978), didasarkan pada aplikasinya maka toksikologi dibagi menjadi tiga yaitu: toksikologi lingkungan, toksikologi ekonomi, dan toksikologi forensik. Toksikologi lingkungan lebih fokus pada kajian racun di lingkungan, seperti terjadinya pencemaran lingkungan, dampak negatif dari proses akumulasi zat kimia di lingkungan, termasuk di dalamnya kesehatan di lingkungan kerja atau toksikologi industri. Toksikologi ekonomi mengkaji tentang kemanfaatan dan nilai ekonomi dan xenobiotik. Sedangkan toksikologi forensik fokus pada penerapannya ilmu toksikologi untuk keperluan pengadilan, berisi analisis racun secara kualitatif ataupun kuantitatif yang nantinya akan digunakan sebagai bukti tindakan kriminal (forensik) selama proses pengadilan.

Toksikologi lingkungan adalah suatu studi yang mempelajari efek polutan terhadap lingkungan dan dampaknya terhadap ekosistem. Toksikologi lingkungan ini sebagai cabang toksikologi yang menggambarkan paparan yang tidak disengaja dalam jaringan biologis. Makhluk hidup dengan zat kimia yang pada dasarnya merupakan bahan baku industri (makanan, kosmetik, obat-obatan, pestisida, dll) dan menyebabkan pencemaran lingkungan (udara, air dan tanah). Toksikologi lingkungan menjadi perhatian khusus mengenai efek merugikan dari bahan kimia terjadi pada manusia baik secara tidak sengaja karena bahan kimia tersebut ada di udara, atau melalui kontak melalui air atau udara. Polusi udara, air dan tanah dapat disebabkan oleh bahan kimia beracun yang masuk ke lingkungan.

Aspek yang dikaji dalam toksikologi lingkungan meliputi interaksi antara manusia dengan perubahan yang terjadi di lingkungan. Bahan racun dapat masuk ke dalam lingkungan yang dapat menimbulkan masalah bagi manusia. Oleh karena itu, toksikologi lingkungan dapat mengkaji tentang topik: sumber bahan toksik, jenis bahan toksik, proses penyebaran bahan toksik, dampaknya ke manusia, karakteristik interaksinya, serta bagaimana cara pengendaliannya. Pada prinsipnya tujuan dari toksikologi lingkungan adalah untuk meningkatkan kesejahteraan manusia, melalui interaksi yang terjadi antara manusia dengan lingkungan yang bersih, terbebas dari racun, ataupun kerusakan yang dapat membahayakannya.

Toksikologi industri adalah cabang toksikologi yang mempelajari zat beracun di tempat kerja dan pengaruhnya terhadap pekerja yang terpapar di tempat kerja. Secara terminologi, toksikologi industri mengacu pada ilmu tentang zat beracun yang digunakan, diproses, diproses dan diproduksi di industri.

Toksikologi industri adalah cabang ilmu toksikologi yang diterapkan dalam industri. Toksikologi industri bermanfaat karena beberapa alasan seperti:

- Diagnosis dan pengobatan keracunan;
- pengembangan obat-obatan, dan efeknya serta efek sampingnya;
- perlindungan Konsumen;
- Perlindungan Kerja dan Kesehatan;
- penentu keputusan produksi;
- Ketahanan lingkungan.

Toksikologi industri sangat dibutuhkan karena saat ini semua orang (terutama pekerja) harus hidup berdampingan dengan "racun" (racun), seperti bahan kimia dasar, zat antara, produk jadi, pupuk, pestisida, cat, sabun, parfum, obat-obatan, kosmetik, dll. Kita tidak bisa membayangkan apa yang akan terjadi jika tidak ada toksikologi, meski kita terpaksa hidup berdampingan dengan zat beracun. Peran ahli toksikologi industri (toksikolog) diperlukan di tempat kerja. Ahli toksikologi industri memiliki pengetahuan dan keterampilan untuk mengidentifikasi sifat toksik bahan kimia di tempat kerja. Toksikologi industri memenuhi syarat untuk mempelajari dan menilai kemungkinan adanya bahan kimia di

lingkungan kerja dan besarnya risiko yang ditimbulkan oleh bahan kimia tersebut. Ahli toksikologi industri juga memberikan saran tentang manajemen risiko.

Berikut ini adalah ruang lingkup toksikologi industri:

- Kehadiran zat beracun di alam.
- Penggunaan dan Manfaat.
- Sifat fisik dan kimia.
- Akses ke tubuh lingkungan kerja.
- Metabolisme: absorpsi, distribusi, biotransformasi, retensi dan ekskresi.
- Efek toksik pada manusia atau hewan (dosis dan waktu paparan).
- Pencegahan berupa Nilai Ambang Batas (NAB) dan Indeks Paparan Biologis (IPB).
- Diagnosis/gejala, pengobatan dan penatalaksanaan kasus keracunan.
- Pertimbangan medis.

1.3 Toksisitas

Toksisitas adalah tingkat atau kemungkinan kerusakan yang disebabkan oleh zat atau senyawa asing yang terpapar pada suatu organisme. Ada beberapa tingkat toksisitas senyawa, misalnya toksisitas akut (terjadi dengan cepat), subakut (terjadi dalam jangka waktu sedang), kronis (terjadi dalam jangka waktu yang lama), atau mematikan (terjadi pada konsentrasi yang dapat menyebabkan kematian segera) dan subletal (terjadi pada konsentrasi yang secara langsung menyebabkan kematian). Pengukuran toksisitas sangat rumit karena tingkat keparahan dapat berbeda-beda

dari satu organ ke organ lainnya dan dipengaruhi juga oleh faktor- faktor seperti usia, genetik, jenis kelamin, pola makan, kondisi fisiologis dan status kesehatan makhluk hidup.

Secara umum, toksisitas dinyatakan sebagai 50% konsentrasi mematikan (LC50) atau 50% dosis mematikan (LD50), yaitu H. konsentrasi atau dosis yang menyebabkan kematian setengah (50%) populasi organisme dalam kondisi tertentu. untuk jangka waktu tertentu. Nilai ini biasanya ditentukan dalam uji toksisitas akut pada hewan laboratorium (Hodgson, 2004).

Dalam uji toksisitas subkronis dan kronis, dikenal ada istilah ADI (*Acceptance Daily Intake*) atau asupan harian yang dapat diterima, NOEL (*No Observed Effect Level*) atau dosis tanpa efek yang terlihat dan NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*) atau dosis tanpa efek toksik. dikenali Ada juga istilah MTD (*Maximum Tolerated Dose*), dosis tertinggi yang dapat ditoleransi tanpa menyebabkan kematian yang berarti selain karena tumor pada hewan laboratorium (Hollinger, 2002).

1.4 Klasifikasi Toksin/Racun

Racun dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa faktor, seperti: sumbernya, sifat kimia dan fisiknya, bagaimana dan kapan asalnya, efek kesehatan, kerusakan organ, dan apakah racun itu hidup atau tidak.

1.4.1 Klasifikasi berdasarkan sumber:

1.4.1.1 Sumber alami/buatan

Klasifikasi ini membedakan toksin sejati dari flora dan fauna dan kontaminasi organisme dengan berbagai toksin dari bahan baku industri beracun atau limbah beracun dan plastik beracun.

1.4.1.2 Sumber titik, area, dan sumber bergerak

Jenis klasifikasi sumber ini biasanya digunakan oleh mereka yang tertarik untuk menyutradarai. Sumber titik tentu saja lebih mudah dikendalikan daripada sumber area dan bergerak.

1.4.1.3 Sumber domestik, komersial, dan industri

Sumber domestik biasanya dari pemukiman, yang kurang beracun jika tidak dicampur dengan pestisida, obat-obatan, dll. Limbah komersial dapat sangat bervariasi, begitu pula limbah industri.

1.1.4.2 Klasifikasi menurut bentuk/wujud

Klasifikasi ini sangat berguna untuk memahami dan mengelola potensi dampak.

1.4.2.1 Wujud pencemar

- 1) Padat: padatan yang sangat halus, yang dikenal sebagai debu, asap atau kabut, dapat menjadi udara, sehingga efeknya bisa sangat luas.

- 2) Cair: banyak digunakan dalam pertanian, dan pengencer biasanya ditambahkan, efeknya tidak secepat gas.
- 3) Gas: dapat menyebar dengan kecepatan penyebaran lebih cepat daripada cairan dan padatan.
- 4) Gas: mempunyai kemampuan kecepatan penyebaran yang lebih cepat dibandingkan dengan cairan dan zat padat.

1.4.2.1 Ukuran, densitas, dan komposisi pencemar

Hal ini memberikan indikasi seberapa mudah polutan masuk ke dalam tubuh inang dan seberapa cepat pengaruhnya serta seberapa jauh jangkauan pengaruhnya.

1.4.3 Klasifikasi berdasarkan sifat fisik dan kimia

1.4.3.1 Korosif

Korosif adalah sifat suatu zat yang dapat menyebabkan kehancuran atau efek buruk pada benda lain. Zat korosif dapat merusak mata, kulit, saluran pernapasan, dan lainnya. Contoh bahan kimia kaustik adalah asam sulfat, asam asetat, asam klorida dan lain-lain.

1.4.3.2 Radioaktif

Bahan radioaktif adalah bahan kimia yang dapat memancarkan sinar radioaktif dengan aktivitas spesifik lebih besar dari 0,002 mikrocurie per gram. Bahan kimia dapat dimasukkan dalam satu atau lebih klasifikasi di atas karena memiliki banyak sifat.

Contoh:

Benzene adalah zat beracun, karsinogenik tetapi juga mudah terbakar, klorin adalah zat beracun juga korosif.

Radioaktif adalah bahan yang terkontaminasi dengan radioisotop penggunaan medis atau penelitian radionuklida. Limbah ini bisa bersumber dari sisa pengobatan isotop, radioimmunoassay dan metode bakteriologis; dapat berupa padat, cair, atau gas.

1.4.3.3 Evaporatif

Bahan beracun yang mudah menguap adalah bahan yang mudah menguap dan biasanya bahan kimia tersebut mudah terbakar. Laboratorium dapat dibagi menjadi tiga kelompok sebagai berikut:

1. Padatan, mis. belerang, hidrida logam, logam alkali, fosfor merah dan kuning.
2. Cair, mis. alkohol, aseton, benzena, eter, metanol, n-heksana, pentana.
- 3) gas seperti hidrogen dan asetilena.

1.4.3.4 Eksplosif

Benda padat atau cair, atau campuran keduanya, yang melalui reaksi kimia pada tekanan dan suhu tinggi, dapat menghasilkan gas dalam jumlah besar dan menyebabkan kerusakan lingkungan. Bahan peledak sangat sensitif terhadap panas dan efek mekanis (gesekan atau benturan), beberapa di antaranya sengaja dibuat untuk tujuan peledakan atau sebagai bahan peledak, seperti trinitrotoluena (TNT), nitrogliserin dan amonium nitrat (NH_4NO_3). Contoh lain adalah asetilena dan amonium nitrat.

1.4.3.5 Reaktif

1. Bahan kimia beracun yang mudah bereaksi dengan air, asam, dan udara, menyebabkannya meledak, terbakar, dan lainnya.
2. Zat yang reaktif terhadap air adalah zat yang bereaksi dengan air, mengeluarkan panas dan gas, membuatnya mudah terbakar, misalnya: Logam alkali dan alkali tanah, halogen dan garam anhidrat, oksida anhidrat, dan sulfuril klorida.
3. Zat yang bereaksi dengan asam adalah zat yang bereaksi dengan asam, mengeluarkan panas dan gas, sehingga mudah terbakar, beracun dan korosif, misalnya: Kalium klorat, kalium perklorat, kalium permanganat dan asam kromat.
4. Semua memerlukan penanganan, pengangkutan dan pembuangan yang berbeda karena potensi bahayanya berbeda.

1.4.4 Klasifikasi atas dasar terbentuknya pencemar/xenobiotik

1. Pencemar yang terbentuk dan keluar dari sumber disebut pencemar primer.
2. Pencemar yang sudah bereaksi dilingkungan disebut pencemar sekunder.
3. Pencemar sekunder yang bereaksi menjadi pencemar tersier.

DAFTAR PUSTAKA

- Hodgson, E. 2004. A Textbook of Modern Toxicology, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Hollinger, M.A., Derelanko M.J., 2002. Handbook of Toxicology, 2nd Edition, CRC Pres LLC: US.
- Klaassen C.D. 2008. Casarett and Doull's Toxicology, The Baasic Science of Poisons. 7th Edition. New York:Mc Graw-Hill.
- Loomis, T.A. 1978. Toksikologi Dasar, Donatus, A. (terjemahan) IKIP Semarang Press: Semarang.
- Lu, F.C. 1995. Toksikologi Dasar, Asas, Organ Sasaran, dan Penilaian Resiko, Nugroho E. (terjemahan). UI Press: Jakarta
- Williams, P., & Burson, J. 1985. Industrial Toxicology. Van Nostrand Reinhold, ed..New York.
- Wirasuta, I.M.A.G dan R. Niruri. 2007. Toksikologi Umum. Fakultas MIPA Universitas Udayana Press: Bali.

BAB 2

KLASIFIKASI TOKSIKAN

Oleh Arina Nuraliza Romas

2.1 Pendahuluan

Berbagai aktivitas atau kegiatan manusia, mulai dari kegiatan di dalam rumah hingga kegiatan di sebuah industri yang sangat besar, pasti menemui sebuah zat yang seringkali tidak digunakan dengan bijak bahkan mengabaikan segala dampak yang terjadi akibat menggunakannya, yaitu toksikan atau zat beracun. Toksikan merupakan salah satu produk yang dibuat serta digunakan kembali dalam berbagai industri. Toksikan ini diciptakan sebagai zat untuk mempercepat atau mempermudah proses pembuatan sebuah produk atau barang, serta sebagai pengawet dalam berbagai produk.

Kehadiran senyawa beracun di udara, air hingga makanan, sering kali menimbulkan berbagai kerugian. Kerugian yang terjadi dapat bersifat langsung maupun tidak langsung, sebagai contoh apabila ada suatu zat beracun di udara dan menempel ke makanan yang akan dihindangkan untuk banyak orang, tentu hal tersebut menimbulkan berbagai reaksi, ada yang bereaksi langsung dengan cara muntah-muntah atau diare, ada juga yang reaksinya secara tidak langsung atau dikemudian hari, akibat endapan dari zat racun yang masuk ke dalam tubuh manusia, kerugian yang fatal adalah sampai kehilangan nyawa. Selain itu juga dapat

menimbulkan kerugian pada lingkungan, kadar zat racun yang dipakai dalam proses kerja sebuah industri, apabila pemakaiannya tidak di atur secara baik dan benar maka dapat mencemari lingkungan.

Kasus-kasus di industri yang seringkali terjadi, mulai dari kebakaran hingga ledakan yang sangat dahsyat, salah satu faktornya adalah toksikan. Penggunaan toksikan yang tidak dibawa atas dasar kesadaran bahwa zat tersebut berbahaya, maka zat beracun tersebut akan digunakan dengan sembarangan tanpa memperhatikan dampak atau efek buruk yang akan terjadi nantinya. Kerugian yang disebabkan, mulai dari kebakaran hingga ledakan yang bisa mengakibatkan korban jiwa dan merugikan perusahaan. Secara materiil akan rugi serta citra dari perusahaan juga akan menurun tajam, karena hal tersebut berdampak bagi masyarakat sekitar.

Penggunaan zat-zat kimia di industri telah tertuang di dalam UU No. 9 Tahun 2008 tentang Penggunaan Bahan Kimia Dan Larangan Penggunaan Bahan Kimia Sebagai Senjata Kimia. Maka dari itu sudah semestinya setiap industri menerapkan apa yang sudah tertulis didalamnya. Jangan sampai menyalahgunakan zat beracun untuk kepentingan pribadi namun dampaknya bisa merugikan banyak orang. Sebagai contoh, dalam sebuah industri informal yang memang tidak berbadan hukum resmi atau berdiri secara ilegal, hal tersebut tentu saja akan berdampak buruk bagi keberlangsungan hidup sumber daya manusia yang bekerja di dalamnya. Maka dari itu, hal tersebut perlu menjadi perhatian bersama, bahwa tidak bisa dipungkiri dalam kehidupan ini manusia sangat berdampingan dengan zat-zat kimia, yang kerap kali digunakan

diberbagai sektor kegiatan, oleh karena itu penting sekali memahami klasifikasi toksikan. Mulai dari sumbernya dari mana, lalu bentuknya seperti apa, hingga potensi bahaya yang ditimbulkan serta masuknya ke dalam tubuh manusia lalu bagaimana reaksi dari tubuh manusia terhadap zat-zat kimia atau toksikan tersebut.

2.2 Pengantar Toksikan

Semakin berkembangnya zaman serta kecanggihan teknologi, penggunaan bahan kimia atau toksikan juga semakin banyak, baik dalam lingkup rumah tangga hingga lingkup industri, mulai dari industri skala kecil hingga skala besar. Dalam *European Inventory of Existing Commercial Substances/ EINECS* tercatat bahwa ada sekitar 100.000 jenis bahan kimia yang diperjual belikan, namun sekitar 4.000 hingga 8.000 yang baru diketahui sifat-sifat serta uji keamanannya. Diantara berbagai bahan kimia tersebut, banyak diantaranya terbukti dapat menimbulkan gangguan kesehatan pada seluruh makhluk hidup (manusia, hewan, tumbuh-tumbuhan) serta ekosistem yang ada didalamnya, bahkan hampir 900 jenis di antaranya memiliki sifat karsinogenik atau pemicu timbulnya sel kanker pada manusia. Diketahui bahwa, setiap tahun sekitar 1.000 jenis bahan kimia baru diproduksi dan miliaran ton limbah kimia dihasilkan dari berbagai aktivitas industri dan manusia (Widmayer, Crombie, Nyaanga, Evans, & Andersen, 2022).

Toksikan merupakan segala jenis bahan yang dapat memberikan efek yang berlawanan atau merugikan. Zat toksik dapat berada dalam bentuk fisik (contoh radiasi), kimiawi

(contoh sianida) maupun biologis (misal bisa ular). Bahan kimia beracun seperti logam berat, pestisida, pelarut, plasticizer, dan penghambat api sekarang dapat ditemukan di udara, air, dan tanah dan, semakin meningkat. Paparan lingkungan dan pekerjaan menimbulkan masalah kesehatan terkait paparan akut dan kronis terhadap bahan kimia di tempat kerja (Pastorino et al., 2022).

Toksikan yang terdapat di industri atau tempat kerja sangat beragam, baik dalam jenis maupun bentuknya. Berikut ini beberapa contoh toksikan yang umum di industri atau tempat kerja, yaitu logam (Pb, Hg, Cd, Cr, Co, As, Al), pelarut/*solvent* (hidrokarbon alifatik, benzena, ester), gas (CO, ozon, HCN), pestisida (organofosfat, karbamat, walfarin), dan partikel udara (silika, asbestos). Tahapan proses mengidentifikasi hingga mengendalikan suatu toksikan beserta efeknya yang terjadidi tempat kerja atau industri disebut dengan simpul pemantauan toksikan. Tahapan dari simpul pemantauan toksikan terdiri dari tiga, yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.1. Simpul pemantauan toksika

Proses kerja	Keterangan
Pemantauan Lingkungan	Simpul pemantauan tahap pertama
	Melakukan pengukuran kadar toksikan di lingkungan kerja
	Pemantauan lingkungan dikembangkan oleh ahli higiene industri
	Hasil pemantauan dievaluasi dengan

Proses kerja	Keterangan
	acuan Nilai Ambang Batas (NAB) di lingkungan kerja
Pemantauan Biologis	Simpul pemantauan tahap kedua
	Melakukan pengukuran dosis toksikan di dalam tubuh pekerja
	Dosis diambil dari marka biologik (biomarker) pada pekerja yang terpajan toksikan
	Pemantauan biologis dikembangkan oleh ahli toksikologi dengan acuan Indeks Paparan Biologis (IPB)
Surveilans Kesehatan	Simpul pemantauan terakhir
	Melakukan pemeriksaan kesehatan dan diagnosis penyakit akibat kerja terhadap pekerja yang positif terpajan toksikan
	Surveilans kesehatan dilakukan oleh dokter spesialis okupasi

2.3 Klasifikasi Toksikan

Toksikan merupakan bahan kimia yang sangat berpotensi memiliki bahaya atau efek samping apabila terpapar langsung dengan tubuh manusia. Proses masuknya toksikan ke dalam tubuh menuju target organ tertentu, penggunaan bahan-bahan kimia, sumbernya berasal dari mana, efek yang timbulkan seperti apa, bentuk fisik dari toksikan, label kegunaannya meliputi apa saja, susunan kimia terdiri dari apa saja serta

bagaimana mekanisme bio-kimia merupakan klasifikasi dari toksikan.

Organ sasaran merupakan bagian tubuh yang akan ditarget atau dituju oleh toksikan, dimana setelah masuknya toksikan ke dalam tubuh dan menuju ke salah satu organ yang ditujunya akan menimbulkan efek samping atau kerusakan pada bagian tubuh (organ) yang spesifik menjadi sasaran toksikan tertentu. Beberapa organ yang banyak menjadi target toksikan, antara lain paru-paru, hati, kulit, ginjal, mata serta sistem reproduksi. Kelainan organ sasaran akibat paparan toksikan harus dideteksi sedini mungkin agar tidak menimbulkan kerusakan yang lebih parah pada setiap organ sasaran (Schnegelberger, Lang, Arteel, & Beier, 2021).

Tabel 2.2. Organ sasaran toksikan

Organ Sasaran	Toksikan	Efek Kesehatan
Ginjal	• Logam (As, Cd, Au, Pb, Hg) • Pelarut hidrokabron berhalogen (klofoform, toluen) • Pelarut glikol (etilen, dietilen) • Herbisida, insektisida • Mikotosin • Pewarna (anilin) • Xenobiotika (aspirin, kanamisin, arsin)	• Gagal ginjal akut (kerusakan glomerulus, obstruksi tubular) • Gagal ginjal kronik (kerusakan tubular kronik, kerusakan sel, iskemia)

Organ Sasaran	Toksikan	Efek Kesehatan
Hati	• Etanol • Alfatoksin • Berilium • Tetrakloroetan • Vinil klorida • Diakil nitrosamin	• Inflamasi hati • Sirosis • Kanker hati
Kulit	• HF, CaO, fenol, nitrogen • Logam (nikel, krom, kobalt) • Toksikondrin • Neomisin, benzokain • Fenol, katekol • Hidrokarbon aromatik polisiklik • Polihidroksi naptal, binefil, dibenzofuran	• Dermatitis kontak iritan • Dermatitis kontak alergik • Gangguan pigmen • Ulserasi • Kanker kulit • Chloracne
Paru-paru	• Klorin, amonia • Oksida nitrogen, fluorin • Fosfin, fosgen, ozon • Sulfur dioksida, sulfur trioksida • Akrolein, isosianat • Asbestos, kromium	• Iritasi paru • Asma/bronkitis • Pneumonia • hipersensitif • Emfisema • Alergi alveolitis • Pneumokoniosis • Kanker paru-paru

Organ Sasaran	Toksikan	Efek Kesehatan
Sistem saraf	• Botulinum, saxitoxin • Pestisida DDT, piretrin • Pikrotoksin, xanthene • Sianida, hidrogen sulfida, azida • Kokain, etanol • Nitrosourea, etilen oksida	Menghambat impuls saraf Anoksia Merusak sistem saraf Kanker otak
Mata	• Klorokuin, klorpromazin • Tioridazin • Aresenik pentavalen • Disulfiram, teambutol	Kerusakan pada kornea Iritasi pada iris Katarak Gangguan pada retina
Sistem reproduksi	• Anilin, benzena, stirena, toluena, merkuri organik • Karbonmonoksida, formaldehid, vinil klorida • Berilium, benzena • Kloroprena, kepone • Karbaril, Pb, radiasi	Gangguan menstruasi Aborsi atau infertil Bayi lahir prematur Teratogenik Kematian ibu Libido dan impoten Tertis/infertil Spermatotoksisitas

Toksikan berkaitan dalam berbagai bidang kehidupan, antara lain dalam industri makanan yaitu penggunaan zat adiktif makanan, dalam bidang pertanian yaitu penggunaan pestisida, dalam industri

kimia, yaitu berkaitan dengan penggunaan pelarut dan komponen lain dalam proses produksi suatu bahan kimia. Penggunaan toksikan telah diatur dengan adanya toksikologi regulatori yaitu mengkaji data yang dikumpulkan dari hasil pemantauan serta penelitian untuk mengambil suatu keputusan tentang penggunaan toksikan serta menentukan batas aman penggunaannya (penetapan nilai ambang batas suatu bahan kimia).

Sumber toksikan dapat ditemukan pada tumbuhan maupun hewan. Beberapa jenis hewan dan tumbuhan, termasuk jenis tanaman pangan, ternyata ada yang mengandung racun alami, walaupun dengan kadar yang sangat rendah akan tetapi berpotensi menyebabkan bahaya kesehatan pada manusia. Racun alami adalah zat yang secara alami terdapat pada tumbuhan, dimana sebenarnya hal tersebut merupakan salah satu mekanisme atau cara dari mereka untuk bertahan hidup melawan serangan jamur, serangga hingga predator. Hal ini juga berlaku pada racun alami dari hewani, sebagai contoh ikan. Keracunan tetrodoksine atau keracunan fugu dapat terjadi pada ikan buntal, globe, tiup, dsb yang mana, racun yang terkandung didalam tubuhnya adalah sebagai cara mereka untuk bertahan hidup (Fowler, Bagdasarov, Camacho, & Reuben, 2021).

Pajanan bahan kimia atau toksikan di berbagai industri dapat mengakibatkan dampak kesehatan yang sangat merugikan, baik bagi manusia maupun lingkungannya. *International Agency for Research on Cancer (IARC)* adalah salah satu badan yang berfungsi mengevaluasi bahan karsinogen, telah mengeluarkan daftar bahan-bahan karsinogen yang dinyatakan terbukti atau terkonfirmasi

mengakibatkan kanker pada manusia. Berikut ini adalah contoh bahan kimia atau toksikan beserta klasifikasi karsinogen:

Tabel 2.3. Klafisikasi Karsinogen

Toksikan	Klasifikasi IARC
Etanol	Diketahui bersifat karsinogen pada manusia
Minyak mineral	Diketahui bersifat karsinogen pada manusia
Benzena	Diketahui bersifat karsinogen pada manusia
Formaldehida	Diketahui bersifat karsinogen pada manusia
Akrilonitril	Diduga karsinogen pada manusia
Diklorometana	Diduga karsinogen pada manusia
Stiren	Diperkirakan karsinogen pada manusia

Toksikan merupakan zat yang memiliki berbagai macam bentuk. bentuk fisik dari toksikan terdiri dari gas, cair dan debu. Bentuk gas, contohnya adalah karbon monoksida, timbal, nitrogen dioksida, ozon, sulfur dioksida, dsb. Bentuk cair, contohnya adalah asam sulfat, asam klorida, asam nitrat, natrium klorida, natrium hidroksida, kalium dhikromat, kalium hidroksida, dsb. Bentuk debu, contohnya adalah debu merkuri, uranium, radium, torium, mangan, timbal, aresen, selenium, nikel, silika, asbes. Bentuk fisik toksikan tersebut dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui beberapa rute pajangan, yaitu sistem pernafasan/ inhalasi, kontak kulit/ dermal, sistem pencernaan/ ingesti (Habeeb et al., 2022).

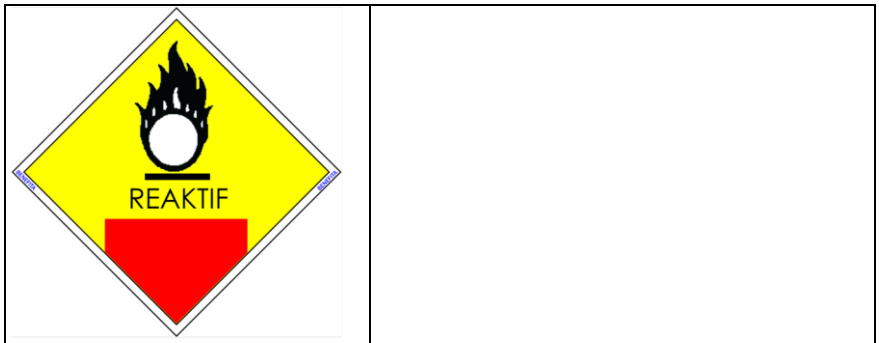
Label kegunaan pada toksikan adalah salah satu cara pencegahan/ perlindungan terhadap penggunaan bahan-bahan kimia yang memiliki sifat mudah terbakar, mudah meledak,

beracun, dsb. Label ditempelkan pada bahan ataupun peralatan yang terkandung bahan kimia berbahaya. Berikut adalah pelabelan pada B3:

Tabel 2.4. Label pada B3

Label	Penjelasan
Gas bertekan 	Gas yang disimpan dibawah tekanan, baik gas yang ditekan maupun gas cair atau gas yang dilarutkan dalam pelarut dibawah tekanan, misal gas acetylene (alkuna) yang digunakan untuk membantu proses pengelasan besi dan baja. Risiko dari gas bertekan adalah mudah terbakar, flashback, dsb.
Korosif 	Bahan kimia yang dapat menyebabkan kerusakan apabila terjadi kontak dengan tubuh manusia atau bahan lainnya, misal asam sulfat, asam asetat, asam klorida, dsb. pH pada bahan korosif berada pada < 2 atau $> 11,5$. Risiko yang dapat terjadi adalah luka, peradangan, iritasi, sensitasi, dsb.
Explosive	Zat padat/cair atau campuran keduanya karena suatu reaksi kimia dapat menghasilkan gas dalam jumlah dan tekanan besar serta suhu tinggi, sehingga dapat menimbulkan ledakan dan menyebabkab kerusakan disekitarnya, misal trinitrotoluene (TNT), nitrogliserin, ammonium nitrat

	(NH_4NO_3), dsb. Risiko yang ditimbulkan adalah ledakan yang bisa berakibat fatal.
Flammable 	Terbagi menjadi 2 jenis yaitu <i>extremely flammable</i> (titik nyala pada suhu 0 derajat Celcius dan titik didih pada suhu 35 derajat Celcius) dan <i>highly flammable</i> (titik nyala pada suhu 21 derajat Celcius dan titik didih pada suhu yang tak terbatas). Risiko yang terjadi adalah kebakaran.
Oxidizing 	Bahan kimia mudah menguap dan terbakar melalui oksidasi. Penyebab kebakaran adalah terjadinya reaksi bahan tersebut dengan udara panas, percikan api atau reaksi bahan yang bersifat reduktor, misal hidrogen peroksida, kalium perklorat, dsb. Risiko yang terjadi adalah kebakaran.
Bahan kimia reaktif	Bahan reaktif jika berinteraksi dengan bahan lain, akan menghasilkan gas beracun bila berinteraksi dengan air. Reaktif terjadi bila ada pengaruh suhu, tekanan serta goncangan, misal alkali, logam halida anhidrat, dsb. Risiko yang terjadi adalah kebakaran dan ledakan.



Pengendalian bahaya bahan kimia yang paling dasar dilakukan adalah administrasi kontrol, dengan cara memberikan keterangan risiko bahaya yang dapat ditimbulkan. Lebih baik mencegah dari pada mengobati, maka sudah seharusnya menjadi perhatian semua pihak, jika pada suatu proses pekerjaan menggunakan serta memerlukan penggunaan bahan kimia, maka pihak manajemen memberikan label serta peringatan bagi para pekerja agar lebih berhati-hati (Marques-da-Silva, Videira, & Lagoa, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Fowler, C. H., Bagdasarov, A., Camacho, N. L., & Reuben, A. 2021. Toxicant exposure and the developing brain: A systematic review of the MRI literature. *ISEE Conference Abstracts*, 2021(1), 105006.
<https://doi.org/10.1289/isee.2021.p-256>
- Habeeb, E., Aldosari, S., Saghir, S. A., Cheema, M., Momenah, T., Husain, K., ... Ansari, R. A. 2022. Role of environmental toxicants in the development of hypertensive and cardiovascular diseases. *Toxicology Reports*, 9(October 2021), 521–533.
<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2022.03.019>
- Marques-da-Silva, D., Videira, P. A., & Lagoa, R. 2022. Registered human trials addressing environmental and occupational toxicant exposures: Scoping review of immunological markers and protective strategies. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 93(January), 103886.
<https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103886>
- Pastorino, P., Prearo, M., Anselmi, S., Bentivoglio, T., Esposito, G., Bertoli, M., ... Renzi, M. 2022. Combined effect of temperature and a reference toxicant (KCl) on *Daphnia middendorffiana* (Crustacea, Daphniidae) in a high-mountain lake. *Ecological Indicators*, 145(October).
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109588>
- Schnegelberger, R. D., Lang, A. L., Arteel, G. E., & Beier, J. I. 2021. Environmental toxicant-induced maladaptive mitochondrial changes: A potential unifying mechanism in fatty liver disease? *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 11(12), 3756–3767.
<https://doi.org/10.1016/j.apsb.2021.09.002>
- Widmayer, S. J., Crombie, T. A., Nyaanga, J. N., Evans, K. S., & Andersen, E. C. 2022. *C. elegans* toxicant responses vary among genetically diverse individuals. *Toxicology*, 479(July), 153292.
<https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153292>

BAB 3

KONSEP DOSIS RESPON DALAM TOKSIKOLOGI

Oleh Karina Mutia Safera

3.1 Pendahuluan

Prinsip dasar toksikologi merujuk pada pemahaman hubungan antara suatu paparan dan dampak yang ditimbulkan. Agar dapat menjelaskan bagaimana suatu paparan berhubungan dengan dampak, maka konsep dosis-respon menjadi sangat penting.

"Semua bahan adalah racun: Tidak ada yang tidak beracun. Namun dosis yang tepatlah yang membedakan sebuah racun dan sebuah obat" Paracelsus (1493-1541). Kutipan tersebut berarti bahwa sebuah dosis yang sangat rendah, bisa menjadi tidak beracun dan berguna (sebuah konsep yang disebut *hormesis*), sedangkan dosis menengah bisa menjadi beracun, serta pada dosis yang tinggi bisa jadi mematikan.

Konsep dosis-respon merupakan konsep yang menggambarkan suatu hubungan antara paparan dan resiko dari suatu hasil. Hubungan dosis-respon menjelaskan apabila terjadi peningkatan dosis maka suatu resiko hasil dapat ikut meningkat atau sebaliknya yakni menurun. Peningkatan suatu paparan/eksposur dapat dilihat dari intensitas atau durasi paparan. Eksposur dapat dicirikan dengan berbagai cara seperi

paparan puncak, durasi paparan, paparan rata-rata yang merupakan rata-rata paparan berdasarkan waktu atau paparan kumulatif yang merupakan jumlah eksposur tertimbang waktu (Pettygrove, 2012).

Periode respon harus dipertimbangkan ketika memeriksa hubungan paparan dengan hasil karena mungkin ada periode laten antara paparan dan hasil. Apabila efek dari paparan diukur terlalu cepat setelah paparan, maka tidak ada efek yang akan terlihat bahkan dalam kasus dimana paparan menyebabkan hasil atau dampak. Contohnya peningkatan resiko leukemia setelah terkena paparan radiasi (Pettygrove, 2012).

Untuk jenis bahan kimia tertentu, terdapat nilai panduan paparan yang tidak akan menimbulkan resiko kesehatan yang berarti. Penetapan nilai panduan ini berasal dari data eksperimen atau observasi. Hal utama yang harus dilakukan yakni melakukan penentuan titik referensi yang merupakan batas terendah atau batas bawah pada dosis (batas atas pada respon) yang sesuai dengan tingkat efek rendah yang diperkirakan atau ditentukan sebelumnya atau tingkat tanpa efek dari kurva dosis-respon.

Titik referensi dapat diperoleh menggunakan metodologi dosis-respon untuk penilaian resiko, seperti menggunakan tingkat efek samping yang tidak diamati/*no observed adverse effect level (NOAEL)* atau tingkat efek merugikan yang diamati terendah dari kurva dosis-respon yang diamati / *lowest observed adverse effect level (LOAEL)*.

3.2 Dosis dan Respon

3.2.1 Dosis

Istilah dosis dapat menjelaskan semua jenis paparan bahan kimia yang masuk ke dalam tubuh dan biasanya juga disebut konsentrasi eksternal atau paparan insidental. Dan karena tubuh merespon konsentrasi di dalam darah dan jaringan, maka dosis selalu berhubungan dengan berat badan (TOXED, 2020). Contohnya, apabila dua orang menerima dosis yang setara dan salah satu orang memiliki berat badan dua kali lebih berat maka akan mendapatkan dosis yang terendah karena badannya lebih besar.

Para ahli menggunakan sistem metrik yang dimana dosis memiliki satuan miligram (mg) per kilogram (kg) berat badan. Deskripsi dosis harus mencerminkan besarnya, frekuensi, dan durasi paparannya. Terdapat tiga jenis dosis yang ada secara bersamaan pada saat organisme terpapar yakni:

(1) Dosis yang diberikan atau dosis eksternal;

Dosis eksternal diartikan sebagai sejumlah bahan kimia yang diberikan pada hewan uji atau manusia dengan kata lain, dosis ini merupakan paparan yang belum terabsorpsi oleh tubuh. Dalam terminologi JECFA (*The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*) dan JMPR (*The Joint FAO/WHO Meetings on Pesticide Residues*), dosis eksternal sering disebut sebagai paparan atau asupan. Contohnya, Pemberian oral adalah rute yang paling relevan dalam menilai resiko pada makanan.

(2) Dosis serap atau dosis internal;

Dosis internal atau dosis diartikan sebagai jumlah bahan kimia yang tersedia secara sistemik dan dapat dianggap sebagai fraksi dari dosis eksternal yang diserap dan masuk ke sirkulasi umum. Dosis jenis ini dapat mencapai target organ dimana efek yang merugikan dapat teramati. Dalam hal ini sangat dipengaruhi oleh penyerapan, distribusi, metabolisme dan ekskresi bahan kimia.

(3) Target atau dosis jaringan

Dosis jaringan diartikan sebagai jumlah bahan kimia yang ada dalam jaringan tertentu yang diminati. Jenis dosis ini relevan apabila respon dari jaringan target memiliki efek kritis (contohnya, konsentrasi total merkuri dan metilmerkuri dalam jaringan tali pusat digunakan oleh JECFA sebagai biomarker paparan janin terhadap metilmerkuri).

3.2.2 Respon

Respon dapat diartikan sebagai reaksi tubuh terhadap bahan kimia. Tubuh dapat bereaksi dengan bahan kimia dalam berbagai cara bergantung pada sifat bahan kimia dan dosisnya (TOXED, 2020).

Untuk mendeskripsikan dosis dan respon, para ahli toksikologi menggunakan kurva dosis-respon. Meskipun terdapat banyak cara untuk menunjukkan bagaimana respon sangat bergantung pada dosis, namun ada dua penjelasan yang sangat umum terjadi. Tipe pertama yakni apabila sejumlah dosis ditingkatkan maka respon juga akan meningkat. Tipe kedua yakni apabila dosis ditingkatkan maka persentase respon dari populasi juga meningkat. Kita tahu bahwa tidak

semua orang dapat merespon secara tepat pada dosis yang sama.

3.3 Dosis Toksikologi

3.3.1 LD50

Lethal Dose 50 (LD50)/ Dosis Letal 50 merupakan suatu besaran dosis tunggal suatu senyawa yang diperkirakan dapat mematikan atau menimbulkan efek toksik pada 50% hewan coba setelah perlakuan. Semakin kecil nilai LD50 maka senyawa tersebut semakin toksik. Begitupun sebaliknya, semakin besar nilai LD50 maka semakin rendah tingkat toksisitasnya (Sulastry, 2009). Potensi toksik pada hewan uji coba dibagi menjadi beberapa kelas, yakni: (Loomis, 1978)

Tabel 3.1. Potensi toksik pada hewan uji coba

NO	Kelas	LD50 (mg/KgBB)
1	Luar biasa toksik	1 atau kurang
2	Sangat toksik	1-50
3	Cukup toksik	50-500
4	Sedikit toksik	500-5000
5	Praktis tidak toksik	5000-15000
6	Relatif kurang berbahaya	Lebih dari 15000

Terdapat beberapa hal yang mempengaruhi nilai LD50 yakni spesies, strain, jenis kelamin, umur, berat badan, gender, kesehatan nutrisi, dan isi perut hewan coba. Pengujian toksisitasnya dilakukan dengan memberikan zat kimia yang sedang diuji sebanyak satu kali atau beberapa kali dalam jangka waktu 24 jam, kemudian diamati selama 14 hari

(Hendriani, 2007). LD50 digunakan untuk menyatakan tingkatan dosis toksik sebagai data kuantitatif, sedangkan gejala klinis, gejala fisiologis dan mekanisme toksik sebagai data kualitatifnya (Jenova, 2009).

3.3.2 NOAEL (*No Observed Adverse Effect Level*)

NOAEL merupakan tingkat paparan tertinggi dimana tidak ada peningkatan yang signifikan secara biologis dalam frekuensi atau tingkat keparahan efek samping antara populasi yang terpapar dan kontrol yang cocok, beberapa efek dapat dihasilkan pada level ini, tetapi tidak dianggap merugikan.

NOAEL dapat diperoleh melalui studi toksisitas dosis berulang 28 hari, 90 hari atau studi toksisitas kronis dan studi toksisitas reproduksi. Angka NOAEL sangat penting untuk menurunkan ambang batas dosis paparan yang aman bagi manusia seperti pengurangan tingkat tanpa efek, batas paparan pekerjaan, dan asupan harian yang dapat diterima.

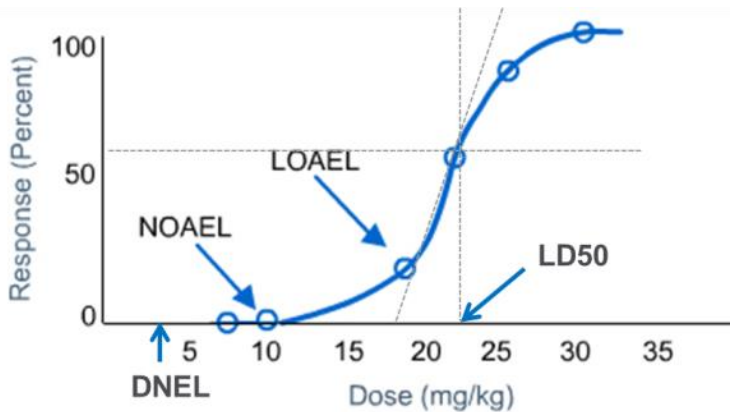
Satuan NOAEL adalah mg/kg/hari untuk rute dermal dan oral. Sedangkan untuk rute inhalasi, NOAEC digunakan sebagai gantinya dan satuannya mg/L/6j/hari atau ppm.

3.3.2 LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*)

LOAEL merupakan tingkat paparan terendah dimana terdapat peningkatan yang signifikan secara biologis dalam frekuensi atau tingkat keparahan efek merugikan antara populasi yang terpapar dan kelompok kontrol yang sesuai. Apabila NOAEL tidak dapat teridentifikasi, maka LOAEL dapat digunakan untuk menurunkan dosis paparan keselamatan ambang batas untuk manusia seperti tingkat tanpa efek yang

diturunkan/ *derived no effect level (DNEL)*. Namun, tetap diperlukan faktor penilaian yang lebih tinggi.

Gambar dibawah menunjukkan hubungan antara :LD50, LOAEL NOAEL, dan DNEL



Gambar 3.1. Kurva Dosis Respon

(Sumber :

http://www.chemsafetypro.com/Topics/CRA/Toxicology_Dose_Descriptors.html)

3.4 Rute Paparan

Para ahli membedakan istilah paparan dan pajanan. Paparan merupakan keadaan ketika bahan toksik memiliki kontak dengan manusia baik melalui inhalasi, kulit, ingesti maupun injeksi. Sedangkan paparan merupakan akibat yang muncul dengan adanya pajanan tersebut. Pajanan dibedakan menjadi dua yakni pajanan langsung dimana terjadi kontak langsung antara sumber pajanan dengan manusia dan pajanan tidak langsung dengan melalui berbagai tahapan atau media (Kurniawidjaja *et al.*, 2021).

Jalur pajanan yang paling cepat masuk ke dalam peredaran darah yakni rute injeksi intravenus yang menyebabkan akan semakin besar dan cepat dampaknya. Namun, kondisi di tempat kerja menyebabkan jalur inhalasi dan dermal menjadi jalur pajanan yang sering terjadi.

Berbagai rute pajanan memiliki satuan dosis yang berbeda-beda. Rute pajanan oral dan kulit memiliki satuan mg/kg, sedangkan rute pajanan inhalasi memiliki satuan mg/m³ atau ppm.



Gambar 3.2. Rute Pajanan

(Sumber : Lestari, 2009 dalam Kurniawidjaja, 2021)

3.5 Organ Sasaran

Organ yang sangat penting untuk didalami karena menjadi sasaran toksikan adalah hati, ginjal, paru-paru, kulit, mata, dan sistem reproduksi. Deteksi dini pada organ tersebut memiliki manfaat untuk mencegah keparahan dari organ sasaran. Di dalam tubuh, darah berperan mengabsorpsi toksikan yang kemudian berikatan dengan protein darah guna didistribusikan ke seluruh jaringan tubuh. Akumulasi dari zat

toksik semisal logam tertinggi terjadi saat proses detoksifikasi di hati dan ekskresi di ginjal (Connel and Miller, 1995).

3.5.1 Organ Hati

Organ yang menjadi tempat reaksi metabolisme adalah organ hati. Zat-zat yang masuk ke dalam tubuh melalui gastrointestinal akan diserap menuju pembuluh darah, namun apabila terdapat zat yang lebih toksik maka zat tersebut di bawa menuju hati untuk di metabolisme kan menjadi zat yang kurang toksik oleh banyak enzim pemetabolisme, salah satunya sitokrom P450 (Burcham, 2014).

Zat toksik yang masuk ke dalam tubuh dapat mempengaruhi sel-sel hati yang mengakibatkan hati mengalami kerusakan sehingga metabolisme zat lain akan semakin sulit. Gangguan yang terjadi pada hati dapat berupa *reversible* dan *irreversible* (Chandrasome, Prakrama and Taylor, 2006). Kerusakan *reversible* pada hati berupa perlemakan hati dan pembengkakan sel.

a. Perlemakan Hati

Perlemakan hati merupakan kondisi ketika trigliserida terakumulasi ke dalam sel-sel parenkim hati. Akumulasi tersebut dikarenakan adanya peningkatan mobilisasi lemak di jaringan yang menyebabkan asam lemak di hati menjadi meningkat. Perlemakan hati dapat disebabkan oleh kebiasaan meminum alkohol yang melebihi batas per hari dan dapat dikarenakan sindrom metabolik berupa obesitas, trigliserida tinggi, kolestrol HDL rendah, hiperglikemia, dan hipertensi.

Perlemakan pada hati yang tidak terkait dengan alkohol dapat menjadi perlemakan hati sederhana

(steatosis) dan steatohepatitis nonalkohol. Kondisi steatosis tidak menyebabkan hati menjadi rentan karena tidak adanya peradangan pada hepatosit. Sedangkan steatohepatitis non alkohol menyebabkan hati mengalami peradangan dan kerusakan. Akibatnya dapat berujung pada penyakit kanker hati.

b. Pembengkakan Sel

Kondisi pembengkakan sel terjadi karna air ekstraseluler masuk ke dalam sel karena adanya gangguan dari pengaturan ion dan volume yang kehilangan ATP (Chandrasome, Prakrama and Taylor, 2006). Air yang tertimbun di dalam sel menyebabkan pembengkakan pada hepatosit dan nantinya dapat membentuk vakuola kecil jernih pada sitoplasma.

Sedangkan kerusakan pada hati yang memiliki sifat *irreversible* yakni nekrosis, fibrosis dan sirosis. Kerusakan yang terjadi secara terus menerus akan menyebabkan hati rusak secara permanen dan tidak dapat kembali seperti keadaan semula.

3.5.2 Organ Ginjal

Ginjal merupakan organ yang menjadi sasaran utama efek dari bahan toksik karena senyawa-senyawa yang masuk ke dalam tubuh di ekskresikan melalui ginjal (Burcham, 2014). Ginjal memetabolisme racun melalui filtrasi pasif glomerulus, difusi pasif tubular, dan sekresi aktif tubular. Molekul yang paling kecil mencapai tubulus dengan cara melalui filtrasi pasif glomerulus, dikarenakan pori-pori kapiler glomerulus dapat

terlewat dengan molekul dengan ukuran hingga 70.000 Dalton. Namun dengan catatan molekul tersebut tidak memiliki ikatan dengan protein serum besar, apabila terdapat ikatan tersebut, maka harus melewati sekresi aktif terlebih dahulu sebelum dikeluarkan.

Zat toksik yang berada di dalam tubuh tidak semua akan menimbulkan efek yang berbahaya karena zat tersebut terlebih dahulu harus berinteraksi dengan target biologis. Zat toksik endogen maupun zat toksik eksogen hanya di distribusikan pada organ tertentu sehingga hanya sedikit dari racun tersebut yang menimbulkan efek dan efek yang ditimbulkan pun hanya menyebabkan keracunan pada organ tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Burcham, P. . 2014. Target-Organ Toxicity: Liver and Kidney, in: *An Introduction to Toxicology*, Springer London, pp. 151–187. doi: 10.1007/978-1-4471-5553-9_6.
- Chandrasome, Prakrama and Taylor. 2006. *Ringkasan Patologi Anatomi (Concise Pathology)*. Jakarta: EGC.
- Connel, D. and Miller, G. 1995. *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*. Cetakan Pe. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Hendriani. 2007. *Uji Toksisitas Subkronis Kombinasi Ekstrak Etanol Buah Mengkudu (Morinda citrifolia Linn.) dan Rimpang Jahe Gajah (Zingiber Officinale rosc.) Pada Tikus Wistar*. Universitas Padjajaran.
- Jenova, R. 2009. *Uji Toksisitas Akut Yang Diukur Dengan Penentuan LD50 Ekstrak Herba Putri Malu (Mimosa pudica L.) Terhadap Mencit balb/c*. Universitas Diponegoro.
- Kurniawidjaja, L. . et al. 2021. *Konsep Dasar Toksikologi Industri*. Depok: Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia.
- Loomis, T. 1978. *Toksikologi Dasar, diterjemahkan oleh Imono Argo Donatus*. Ed. 3. Semarang: Semarang IKIP Semarang Press.
- Pettygrove, S. 2012. *Encyclopedia of Epidemiology*, SAGE Publications, Inc. Thousand Oaks.
doi: 10.4135/9781412953948.
- Sulastry, F. 2009. *Uji Toksisitas Akut yang Diukur dengan Penentuan LD50 Ekstrak Daun Pegagan (Centella asiatica (L.) Urban) terhadap Mencit BALB/C*. Universitas Diponegoro.
- TOXED. 2020 *Basics of Dose-Response, Toxicology Education Foundation*. Available at:
<https://toxedfoundation.org/basics-of-dose-response/>
(Accessed: 18 December 2022).

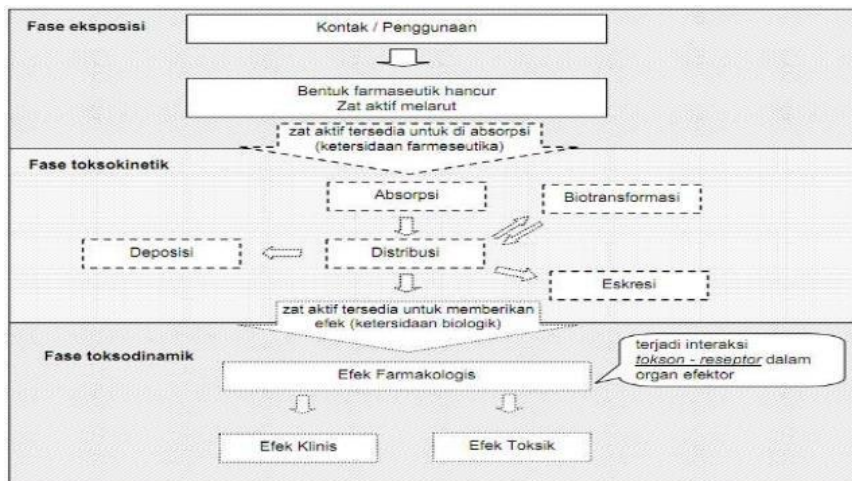
BAB 4

INTERAKSI ZAT DALAM FASE EKSPOSISI, TOKSOKINETIK, TOKSIDINAMIK

Oleh Muh Taufiqurrahman

4.1 Pendahuluan

Mekanisme kerja toksik biasanya muncul sebagai akibat dari berbagai proses, beberapa di antaranya sangat kompleks. Ada dua kategori mekanisme aksi untuk aktivitas berbahaya yang berbeda, yaitu: Aksi toksik yang didasarkan pada interaksi kimiawi, seperti pembentukan ikatan kimia kovalen antara suatu zat atau metabolitnya dan substrat biologis, atau berdasarkan pada perubahan kimia dalam substrat biologis sebagai akibat dari perubahan kimia. Jarang proses ini berlaku untuk obat yang digunakan untuk tujuan pengobatan. Istilah "efek toksik" mengacu pada berbagai situasi atau elemen yang memengaruhi seberapa baik suatu bahan kimia diserap dan didistribusikan di dalam tubuh. Kehadiran zat kimia atau metabolitnya dalam sel target atau di tempat kerjanya dipengaruhi oleh atau ditentukan oleh efek toksik.



Gambar 4.1. Fase toksodinamik

Fase toksodinamik meliputi interaksi antara toksion dan reseptor pada organ. Proses ini biasanya dibagi menjadi tiga fase: paparan, fase toksokinetik, dan fase toksodinamik

4.2 Fase Eksposisi

Dalam berbagai literatur, sebagian ahli membedakan antara pengertian pajanan dan paparan. Pajanan dapat diartikan sebagai kontak antara toksikan dan manusia. Kontak tersebut dapat terjadi melalui inhalasi, kulit, ingesti, ataupun injeksi (intentional poisoning). Sementara itu, paparan adalah akibat yang ditimbulkan oleh adanya kontak antara toksikan dengan manusia. Biasanya, hanya bentuk racun yang larut dan tersebar secara molekuler yang diserap ke dalam sistem sistemik. Periode ini biasanya ditandai sebagai fase farmakologis ketika berbicara tentang efek obat. Bentuk sediaan obat hancur selama fase farmasetika, dan pada titik

kontak, bahan aktif juga larut dan disebarluaskan secara molekuler agar bahan aktif siap masuk ke sistem peredaran darah dan diserap. Komponen zat terabsorpsi dari sediaan farmasi memainkan peran utama dalam menentukan fase ini.

Pada tahap ini, xenobiotik dan organisme membentuk sebuah kotak, atau dengan kata lain organisme terpapar xenobiotik. Paparan ini dapat terjadi melalui kulit, mulut, saluran pernapasan (inhalasi), atau konsumsi langsung xenobiotik ke dalam tubuh organisme (injeksi). Kecuali zat radioaktif, Konsekuensi biologis atau toksik akan terjadi ketika objek biologis terpapar xenobiotik jika telah diserap ke dalam sistem sistemik. Hanya xenobiotik yang larut dan tersebar secara molekuler yang biasanya dapat diserap menuju sistem sistemiknya. Jika terpapar xenobiotik secara oral, misalnya dengan mengonsumsi tablet, kapsul, atau serbuk, tablet atau kapsul tersebut harus terlebih dahulu terurai atau hancur sebelum xenobiotik dapat larut dalam cairan saluran pencernaan. Biasanya, xenobiotik terlarut dari usus kecil dengan cepat diserap di duodenum dan ditransfer melalui kapiler mesenterika ke vena portal hepatik ke hati sebelum memasuki sirkulasi sistemik. Konsentrasi dan durasi kontak antara xenobiotik dan permukaan organisme yang dapat menyerapnya berdampak signifikan terhadap penyerapan xenobiotik. Dalam hal ini, potensi efek biologis/toksik akan bergantung pada laju penyerapan dan jumlah xenobiotik yang tertelan. Proses pelepasan molekul obat dari keadaan farmasetika inilah yang disebut fase farmasi dalam konteks penggunaan obat (tablet, kapsul, salep, dll.). Ketersediaan farmasetika mengacu pada jumlah bahan obat dalam dosis

yang tersedia untuk penyerapan. Pada kenyataannya, sering ditemukan bahwa sediaan tablet yang dibuat oleh berbagai pabrik farmasi tetapi mengandung bahan aktif yang sama dapat memiliki efek farmakologis yang berbeda. Ketersediaan obat yang berbeda mungkin menjadi alasannya. Karakteristik fisiko-kimia suatu sediaan, seperti ukuran dan bentuk kristal, serta jenis adjuvan (aditif dalam tablet) dan proses pembuatannya, memengaruhi seberapa tersedia secara farmasi.

Karakteristik fisika-kimia xenobiotik, seperti bentuk dan ukuran kristal, kelarutan air atau lipid, dan konstanta disosiasi, tidak boleh diabaikan dalam hal ini. Karakteristik ini, selain bentuk farmasi, memiliki dampak yang signifikan terhadap penyerapan dan, akibatnya, tingkat toksisitasnya. Komposisi membran biologis dan aliran kapiler darah pada titik kontak mempengaruhi seberapa cepat xenobiotik diserap. Sebuah xenobiotik harus melintasi membran sel di situs kontak agar dapat diserap/diserap di situs kontak. Biasanya, membran sel terdiri dari lapisan biomolekul yang terbuat dari molekul lipid dan molekul protein berserakan. Sistem pencernaan, paru-paru, dan kulit adalah tiga organ utama tempat xenobiotik diserap. Namun, paparan xenobiotik melalui rute injeksi, seperti intravena, intramuskular, subkutan, intraperitoneal, dan rute injeksi lainnya, dapat terjadi pada kasus keracunan yang tidak disengaja atau studi toksikologi.

4.2.1 Eksposis Melalui Kulit

Kontak kulit yang disengaja atau tidak disengaja adalah cara paling sederhana dan paling sering bagi manusia atau hewan untuk terpapar xenobiotik apa pun, termasuk kosmetik, peralatan rumah tangga, obat topikal, racun lingkungan, atau kontaminan industri di tempat kerja. Epidermis, yang merupakan lapisan terluar kulit, dan dermis, yang berada di atas jaringan subkutan, membentuk kulit. Dermis tebalnya sekitar 2 mm, tetapi lapisan epidermis memiliki ketebalan yang relatif sederhana, rata-rata antara 0,1 dan 0,2 mm. Membran basement memisahkan kedua tingkat ini. Stratum germinativum, yang menyediakan lapisan luar dengan sel segar, adalah lapisan sel basal yang membentuk lapisan epidermis. Sel yang baru terbentuk ini berkembang menjadi sel granular, kemudian sel berduri (stratum spinosum) (stratum granulosum). Sel-sel ini juga membuat keratohidrin, yang berkembang menjadi keratin di lapisan tanduk dari stratum korneum terluar. Melanosit yang membuat pigmen, serta sel Langerhans yang berfungsi sebagai makrofag dan limfosit, juga terdapat di epidermis. Kedua sel ini akhir-akhir ini ditemukan berperan dalam sejumlah reaksi imunologi. Kolagen dan elastin, yang merupakan komponen penting untuk mempertahankan kulit, merupakan bagian terbesar dari dermis. Sebagian besar sel pada lapisan ini adalah fibroblas, yang berperan penting dalam pembuatan senyawa dasar seperti asam hialuronat, kondroitin sulfat, dan mukopolisakarida serta protein berserat. Ada sel lain selain sel ini, seperti sel lemak, makrofag, histosit, dan mastosit. Jaringan subkutan terletak di bawah dermis. Selain itu, ada beberapa

struktur tambahan, termasuk sel saraf, kelenjar keringat, kelenjar sebaceous, kapiler pembuluh darah, dan folikel rambut. Berbagai lesi (luka) biasanya disebabkan oleh paparan toksin pada kulit, meskipun penyerapan toksin ke dalam sistem sistemik juga kadang terjadi.

4.2.2 Eksposisi Melalui jalur Inhalasi

Menghirup xenobiotik ini dapat membuat seseorang terkena xenobiotik di udara. Ada banyak ukuran gas, uap, tetesan cairan, dan partikel padat yang merupakan racun di udara. Selain itu, ingatlah bahwa sistem pernapasan adalah mekanisme rumit yang secara alami memiliki kemampuan untuk memilih partikel berdasarkan ukurannya. Akibatnya, karakteristik fisik racun yang terhirup serta toksisitasnya berperan dalam penyerapan dan efek berbahayanya.

Nasofaring, trakea, dan saluran bronkial membentuk saluran pernapasan, seperti halnya asinus paru-paru, yang terdiri dari bronkiolus pernapasan, saluran alveolar, dan alveoli. Nasofaring berfungsi menambahkan uap air ke udara yang dihirup, menyaring partikel besar, dan mengontrol suhu. Partikel besar (lebih besar dari 10 mikron) biasanya tidak menembus sistem pernapasan; jika ya, mereka disimpan di hidung dan dihilangkan dengan menyeka, bernapas, dan melambai. Saluran udara yang mengarah ke alveoli adalah trakea dan tabung bronkial. Epitel bersilia yang melapisi trakea dan bronkus ditutupi lapisan tipis lendir yang dilepaskan oleh sel-sel lapisan epitel tertentu. Lapisan ini dapat mengangkat partikel yang terkumpul di permukaan menuju mulut dengan bantuan silia dan lendirnya. Sistem pernapasan kemudian

dibersihkan dari partikel yang mengandung lendir dengan meludah atau menelan. Namun, difusi dan fagositosis juga dapat menyerap tetesan cairan dan partikel padat kecil. Fagosit yang mengandung partikel akan diambil oleh sistem limfatik. Limfatik juga bisa mendapatkan beberapa partikel bebas. Partikel yang telah larut dapat melewati epitel dan memasuki sirkulasi. Situs utama untuk penyerapan xenobiotik adalah alveoli, yang dapat menyerap xenobiotik sebagai gas seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, sulfur dioksida, atau uap cair seperti benzena dan karbon tetraklorida. Luas permukaan alveolar, laju aliran darah, dan jarak antara darah dan udara di alveoli merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi seberapa mudah zat diserap. Kelarutan gas dalam darah mempengaruhi laju penyerapan.

4.2.3 Eksposisi Melalui Jalur Saluran Cerna

Paparan toksin melalui saluran pencernaan dapat terjadi dengan makanan, minuman, atau dengan sendirinya sebagai obat atau bahan kimia murni. Pada saluran ini, toksin dapat tertelan secara sublingual dari rongga mulut, dihirup dengan sengaja melalui rute rektal, atau diteruskan dari lambung ke usus kecil. Secara umum, senyawa yang tidak terserap tidak akan menimbulkan efek berbahaya, kecuali yang bersifat basa atau asam berlebihan, atau zat yang dapat mengiritasi mukosa. Karena asam lambung yang tinggi, bahan kimia asam lemah biasanya akan ada sebagai bentuk non-ionik, yang lebih mudah larut dalam lipid dan menyebar. agar perut mudah menyerap zat tersebut. Jus lambung akan terionisasi berbeda dengan zat basa lemah, sehingga lebih mudah larut dalam jus lambung.

Bahan kimia basa lemah akan lebih mudah diserap melalui usus daripada lambung karena mereka akan dalam bentuk non-ionik karena cairan usus bersifat basa. Racun sering pergi dari saluran pencernaan ke seluruh tubuh melalui difusi pasif, yang merupakan bentuk transportasi di mana perbedaan konsentrasi berfungsi sebagai kekuatan utama. Tapi selain difusi pasif, transpor aktif juga ada di usus. Contohnya termasuk transfer bantuan menggunakan pembawa atau pinositosis. Tapi selain difusi pasif, transpor aktif juga ada di usus. Contohnya termasuk transfer bantuan menggunakan pembawa atau pinositosis. Tapi selain difusi pasif, transpor aktif juga ada di usus. Contohnya termasuk transfer bantuan menggunakan pembawa atau pinositosis.

4.3 Fase Toksikokinetik

Dua jenis utama proses biologis yang terjadi selama fase toksikokinetik adalah invasi dan evesi. Sementara evesion juga disebut sebagai eliminasi, proses invasi memerlukan penyerapan, pengangkutan, dan penyebaran. Xenobiotik diserap ketika memasuki aliran darah atau sistem limfatik dari bagian luar tubuh (termasuk mukosa gastrointestinal) atau dari lokasi tertentu di dalam organ dalam. Jika xenobiotik memasuki sistem sirkulasi sistemik, mereka akan melakukan perjalanan melalui sistem sirkulasi dengan aliran darah. Distribusi dibagi menjadi konveksi (pergerakan xenobiotik dengan sirkulasi darah) dan difusi. Sedangkan reaksi biotransformasi dan ekskresi atau disebut juga eliminasi (evesion) dapat menurunkan kadar xenobiotik dalam tubuh suatu sistem biologis atau organisme. sekelompok prosedur

yang dikenal bersama sebagai ADME, atau adsorpsi, distribusi, metabolisme, dan eliminasi.

Jumlah xenobiotik (dalam keadaan aktif) yang dapat memasuki sistem sistemik atau mencapai tempat kerja akan tergantung pada mekanisme penyerapan. Ketersediaan hayati xenobiotik mengacu pada seberapa banyak dari mereka dapat mencapai sistem sistemik. Keseluruhan rangkaian peristiwa selama fase toksikokinetik ini akan menentukan efikasi xenobiotik (kemampuan menimbulkan efek), efektivitas, konsentrasi pada reseptor, dan durasi dampak farmakodinamik. Farmakokinetik adalah cabang ilmu yang mempelajari bagaimana konsentrasi xenobiotik berfluktuasi dari waktu ke waktu dalam tubuh makhluk hidup (juga dikenal sebagai kinetika). Secara umum, toksikokinetik menyelidiki kecepatan xenobiotik diserap ke dalam sistem peredaran darah dari tempat paparan, distribusinya di dalam tubuh, bagaimana enzim tubuh memetabolisme mereka, dan di mana dan bagaimana toksin atau metabolitnya dikeluarkan dari tubuh.

4.3.1 Absorpsi

Penyerapan didefinisikan sebagai penyerapan xenobiotik atau racun ke dalam pembuluh limfatik tubuh atau sirkulasi sistemik dari titik kontak (paparan). Jumlah xenobiotik yang memasuki sirkulasi sistemik dalam bentuk aslinya dikenal sebagai absorpsi. Secara umum, toksin dapat diserap ketika dilarutkan atau didistribusikan secara molekuler. Karakteristik anatomis dan fisiologis dari tempat penyerapan (seperti karakteristik membran biologis dan aliran kapiler darah di

tempat kontak), serta karakteristik fisiko-kimia dari toksin dan bentuk farmasetika dari toksin (tablet, salep, sirup, aerosol, suspensi), semuanya mempengaruhi absorpsi sistemik toksin dari tempat ekstrasvaskular. atau obat). Sistem pencernaan, paru-paru, dan kulit adalah tempat utama penyerapan toksin. Dapat diklaim bahwa toksin tidak melalui fase penyerapan ketika diberikan langsung ke sistem sirkulasi sistemik (melalui injeksi). Tanpa dispersi dan ekskresi serta transportasi melalui membran sel, penyerapan xenobiotik tidak akan terjadi. Akibatnya, membran sel (membran biologis) dalam penyerapan berfungsi sebagai "penghalang", atau batas antara lingkungan interior dan eksterior. Awalnya, diperkirakan bahwa membran biologis hanyalah sel yang tertata, yang disusun dengan cara yang sama. Hasilnya, bagaimanapun, menunjukkan bahwa struktur membran pada organ yang berbeda berbeda secara signifikan. Dengan model Fluid Mosaik mereka, LEONARD dan SINGER memperkenalkan sudut pandang ini untuk pertama kalinya. Menurut teori ini, membran terdiri dari lapisan ganda lipid dan protein yang telah diikat di dalam atau di atasnya untuk membuat mosaik pulau. Pori-pori lipid bilayer dibuat oleh setiap protein yang memasuki membran. Akibatnya, telah dinyatakan bahwa membran biologis bersifat dinamis, yang berarti mereka terus berubah. melintasi membran sel oleh xenobiotik. Difusi pasif, filtrasi melalui pori-pori di membran "poren", transportasi melalui molekul pembawa "pembawa", dan ditangkap oleh sel "pinositosis" adalah semua metode yang memungkinkan xenobiotik untuk melintasi membran.

4.3.2 Distribusi

Xenobiotik akan diedarkan/didistribusikan ke seluruh tubuh bersama darah setelah masuk ke dalam sistem peredaran darah. Ini kemudian akan ditransfer dari sistem sirkulasi sistemik melalui membran sel ke sistem organ atau jaringan tubuh. Distribusi xenobiotik dalam tubuh dapat dianggap sebagai transit xenobiotik yang dapat dibalik dari satu bagian tubuh ke bagian tubuh lainnya. Distribusi adalah proses di mana xenobiotik secara reversibel keluar dari aliran darah dan memasuki interstitium (cairan ekstraseluler) dan/atau memasuki sel dari jaringan atau organ, menurut beberapa buku referensi. Pakar farmakokinetik mendefinisikan badan yang terdiri dari banyak area distribusi, yang didukung oleh model langsung, agar proses distribusi lebih mudah dipahami. Model kompartemen tunggal adalah yang paling mudah untuk ini. Berbeda dengan model yang menggambarkan tubuh sebagai wilayah homogen (mirip dengan ember besar), dalam situasi ini, distribusi xenobiotik hanya diatur oleh kekuatan konveksi di dalam ember. Namun, pada kenyataannya, xenobiotik harus melewati membran biologis, khususnya membran yang mengelilingi sel-sel tubuh, untuk dapat ditransfer dari saluran kapiler arteri darah ke sel-sel jaringan tubuh. Harus ada setidaknya dua celah yang dibatasi oleh membran agar transpor transmembran dimungkinkan. Untuk lebih lanjut membagi tubuh menjadi kompartemen intraseluler dan ekstraseluler, yang masing-masing memiliki setidaknya dua area. Pada manusia, ruang intraseluler membentuk sekitar 75% dari berat badan, dan ruang ekstraseluler merupakan 22% sisanya. Baik cairan intraseluler

dan bagian padat sel terkandung di dalam ruang intraseluler. Air plasma, ruang usus, dan cairan transelular (termasuk cairan serebral, aqueous humor, perilymph, dan endolymph serta cairan rongga tubuh dan organel berongga) membentuk tiga kategori ruang ekstraseluler. Konveksi (pengangkutan xenobiotik melalui peredaran darah) dan transmembran (pengangkutan xenobiotik melalui membran biologis) adalah dua proses utama yang dapat digunakan untuk mendistribusikan xenobiotik dalam tubuh. Pencampuran xenobiotik dalam darah, laju aliran darah, dan laju transpor transmembran semuanya berdampak pada bagaimana xenobiotik didistribusikan ke seluruh tubuh.

4.3.3 Metabolisme

Ketika xenobiotik masuk ke dalam tubuh, sistem enzim tubuh akan memprosesnya sedemikian rupa sehingga struktur kimianya berubah dan akhirnya dapat dikeluarkan dari tubuh. Reaksi biotransformasi, juga dikenal sebagai reaksi metabolisme, adalah proses biokimia yang dilalui "xenobiotik". Hati biasanya merupakan tempat biotransformasi atau metabolisme, dengan jumlah yang lebih kecil juga terjadi di ginjal, paru-paru, sistem pencernaan, kelenjar susu, otot, kulit, atau darah. Fase I (reaksi fungsionalisasi) dan fase II adalah pembagian umum dari proses biotransformasi (reaksi konjugasi). Melalui reaksi oksidasi (dehalogenasi, dealkilasi, deaminasi, desulfurisasi, pembentukan oksida, hidroksilasi, oksidasi alkohol dan oksidasi aldehida), reaksi reduksi (reduksi azo, reduksi nitro, reduksi aldehida atau keton), dan hidrolisis, molekul toksin akan mengalami pengenalan gugus fungsi baru,

perubahan gugus fungsi yang ada, atau reaksi dekomposisi pada fase awal ini (hidrolisis ester amida). Racun yang telah menyelesaikan fase I metabolismenya akan berpasangan (membentuk konjugat) atau mengalami proses sintesis dengan zat endogen tubuh pada fase II. Contoh dari proses ini meliputi konjugasi dengan asam amino glukuronida, asam sulfat, metilasi, alkilasi, dan produksi asam merkaptopurat. Secara umum, enzim yang terlibat dalam biotransformasi tidak spesifik substrat. Selain bentuk ikatannya yang sudah ada sebagai enzim terlarut (seperti esterase, amidase, dan sulfoterase), enzim ini (seperti monooxygenase dan glucuronidase) juga sebagian terlokalisasi di mitokondria. Enzim ini biasanya melekat pada membran retikulum endoplasma. Retikulum endoplasma halus biasanya menampung sistem enzim yang terlibat dalam proses fase I, sedangkan sitosol biasanya menampung sistem enzim yang terlibat dalam reaksi fase II. Sistem enzim ini berpartisipasi dalam reaksi biotransformasi zat endogen (seperti hormon steroid, bilirubin, asam urat, dll.) Selain memetabolisme xenobiotik. Bakteri flora usus dapat melakukan proses metabolisme, termasuk proses reduksi dan hidrolisis, selain organ tubuh. Retikulum endoplasma halus biasanya menampung sistem enzim yang terlibat dalam proses fase I, sedangkan sitosol biasanya menampung sistem enzim yang terlibat dalam reaksi fase II. Sistem enzim ini berpartisipasi dalam reaksi biotransformasi zat endogen (seperti hormon steroid, bilirubin, asam urat, dll.) Selain memetabolisme xenobiotik. Bakteri flora usus dapat melakukan proses metabolisme, termasuk proses reduksi dan hidrolisis, selain

organ tubuh. Retikulum endoplasma halus biasanya menampung sistem enzim yang terlibat dalam proses fase I, sedangkan sitosol biasanya menampung sistem enzim yang terlibat dalam reaksi fase II. Sistem enzim ini berpartisipasi dalam reaksi biotransformasi zat endogen (seperti hormon steroid, bilirubin, asam urat, dll.) Selain memetabolisme xenobiotik. Bakteri flora usus dapat melakukan proses metabolisme, termasuk proses reduksi dan hidrolisis, selain organ tubuh selain metabolisme xenobiotik. Bakteri flora usus dapat melakukan proses metabolisme, termasuk proses reduksi dan hidrolisis, selain organ tubuh.) selain metabolisme xenobiotik. Bakteri flora usus dapat melakukan proses metabolisme, termasuk proses reduksi dan hidrolisis, selain organ tubuh.

4.3.4 Ekskresi

Racun dan xenobiotik dapat dihilangkan dengan cepat atau lambat setelah tertelan dan disebarluaskan ke seluruh tubuh. Baik bentuk asli xenobiotik maupun metabolitnya dihilangkan. Meskipun hati dan paru-paru juga merupakan organ ekskresi yang signifikan untuk beberapa racun, ginjal dan urin adalah jalur utama ekskresi sebagian besar racun. Selain itu, ada sistem ekskresi lain yang kurang signifikan, termasuk kelenjar keringat, ludah, dan susu. ekskresi dalam urin. Bahan kimia asing (xenobiotik) dan endogen, yang biasanya tidak lagi dibutuhkan oleh organisme, diekskresikan oleh ginjal. Filtrasi glomerulus, sekresi tubular aktif, dan resorpsi tubular pasif adalah tiga mekanisme utama ekskresi ginjal xenobiotik. Ukuran molekul sangat penting dalam filtrasi

glomerulus. Filtrasi glomerulus tidak dapat memproses objek yang lebih besar dari 70 atau beratnya lebih dari 50 kilo Dalton (k Da). Hanya zat yang lebih ringan dan ukurannya lebih kecil yang akan dikeluarkan.

Xenobiotik yang melekat pada protein plasma pasti tidak dapat dihilangkan oleh ginjal. Gradien konsentrasi xenobiotik antara urin dan plasma dalam pembuluh darah tubular mengontrol resorpsi tubular pasif. Sekresi tubular membutuhkan transpor aktif sebagai lawan dari resorpsi tubular. Selain itu, racun dapat secara pasif menyebar ke dalam urin melalui tubulus keluarnya empedu. Hati adalah organ tubuh yang penting untuk ekskresi xenobiotik, terutama dalam hal kojugat yang melekat pada protein plasma, senyawa dengan berat molekul lebih dari 300, dan zat dengan polaritas kuat (anion dan kation). Setelah zat ini berada di empedu, mereka biasanya dikeluarkan melalui tinja daripada diserap kembali ke dalam sirkulasi.

Namun, ada beberapa konjugat glukuronida yang dapat dipecah menjadi bentuk bebasnya oleh mikrobiota usus dan kemudian diserap kembali ke dalam aliran darah. Beberapa tes di mana toksisitas dietilstibestrol meningkat 130 kali lipat pada tikus dengan saluran empedu yang terikat menunjukkan pentingnya ekskresi empedu. ekskresi paru Pada suhu tubuh, zat-zat yang berupa gas terutama dikeluarkan melalui paru-paru. Selain itu, mudah dikeluarkan oleh udara yang dihirup adalah cairan yang mudah menguap. Kloroform dan halotan adalah contoh cairan yang sangat larut dalam lemak yang dapat dihilangkan dengan sangat lambat. karena volume ventilasi yang terbatas dan fakta bahwa mereka terkubur dalam

jaringan adiposa. Difusi sederhana melalui membran sel menyebabkan xenobiotik diekskresikan melalui paru-paru. satu baris lagi

Saluran ekskresi ini—ekskresi cairan bersama feses, ekskresi racun melalui kelenjar susu (ASI, ASI), kekeringan, dan air liur—biasanya memainkan peran yang sangat kecil dibandingkan dengan jalur utama yang disebutkan di atas. Ketika ibu akan melewati senyawa berbahaya dari ASInya ke anaknya atau dari susu sapi ke manusia, jalur ekskresi melalui kelenjar susu menjadi sangat penting. Bahan kimia alkali akan terakumulasi dalam susu dalam jumlah yang lebih tinggi daripada dalam plasma karena keasaman susu yang rendah, sedangkan senyawa asam sebaliknya berlaku untuk senyawa asam.

4.4 Fase Toksikodinamik

Interaksi toksin dengan reseptor (tempat aksi toksik) dan proses terkait, yang pada akhirnya menyebabkan efek toksik/farmakologis, disebut sebagai fase toksodinamik. Secara umum, interaksi reseptor-tokson bersifat reversibel. Ketika xenobiotik dihilangkan dari tempat kerjanya, ini menyebabkan perubahan fungsional yang biasanya hilang (reseptor). Kadang-kadang ada interaksi ireversibel antara xenobiotik dan substrat biologis selain yang reversibel. Interaksi ini didasarkan pada pembentukan ikatan kimia kovalen ireversibel antara xenobiotik dan substrat biologis atau pada perubahan kimia pada substrat biologis yang disebabkan oleh perubahan kimia yang diinduksi xenobiotik, seperti pembentukan peroksida. Ini terutama berlaku untuk tindakan karsinogenik dan mutagenik

karena seringkali, efek dari dua karsinogen atau dua mutagen akan digabungkan untuk menghasilkan efek tunggal yang dikenal sebagai penjumlahan (penjumlahan). Selain itu, paparan mutagen atau karsinogen sebelumnya harus dipertimbangkan. Penjumlahan pekerjaan juga dapat terjadi pada cedera kronis sebelumnya. Misalnya, masih diperdebatkan apakah seseorang yang banyak merokok, terutama rokok putih, dan sering mengalami bronkitis kronis harus ditempatkan pada posisi yang merangsang saluran udara mereka lebih jauh. Secara umum, setiap orang yang bekerja dalam posisi yang mengharuskan kontak dengan bahan yang dapat menyebabkan kerusakan kronis harus dibatasi jam kerjanya. Misalnya, perubahan atau transfer pekerjaan setelah waktu pemaparan tertentu. Orang yang secara teratur menggunakan narkoba atau merokok akan lebih mungkin untuk jatuh sakit di tempat kerja. Untuk mengidentifikasi dan mengatasi masalah akibat penggunaan campuran berbagai bahan kimia, senyawa aktif biologis dapat diklasifikasikan menurut interaksi toksikodinamiknya. Ada dua kemungkinan hasil bila dua senyawa digabungkan: (1) kombinasi zat aktif A dengan zat tidak aktif B yang dapat mempengaruhi aktivitas zat aktif A, dan (2) kombinasi dua zat aktif.

4.4.1 Antagonisme

Pada jenis tempat kerja secara aktif yang sama, atau reseptor, adalah target agonis dan antagonis dalam jenis antagonisme ini. Antagonis meminta agonis untuk meninggalkan pekerjaannya. Metabolit dan antimetabolit, vitamin dan antivitamin, histamin dan antihistamin, kolinergik

dan antikolinergik, dll. Semuanya menunjukkan jenis perilaku antagonis ini. Antagonis yang bersifat kompetitif (kompetitif) dapat menggantikan agonis tetapi tidak mengambil alih peran agonis. Karena banyak penangkal mendasarkan penelitian mereka pada hubungan antagonis kompetitif, mereka sangat penting dalam toksikologi. Konflik kimia. Antagonisme di mana antagonis bergabung secara kimiawi dengan agonis dan kemudian membuatnya tidak aktif dikenal sebagai antagonisme dengan netralisasi. Perawatan keracunan sering mendapat manfaat dari konflik semacam ini. Fase toksikokinetik adalah ketika konflik kimia terjadi permusuhan non-kompetitif. Antagonis menghalangi aksi agonis dalam antagonisme non-kompetitif, tanpa juga menanggapi reseptor unik agonis. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi antagonis non-kompetitif pada tingkat respons biokimia atau biofisik, yang ada setelah kontak agonis-reseptor yang menghasilkan manifestasi nyata dari efek tersebut. Beberapa saingan tidak memiliki persaingan dalam lini bisnis mereka. Antagonis non-kompetitif juga dapat menentang beberapa agonis dengan berbagai tempat kerja, sedangkan antagonis yang berbeda dapat memusuhi agonis yang sama. Banyak penangkal, terutama yang diresepkan untuk menghilangkan gejala keracunan, berfungsi sebagai antagonis non-kompetitif konflik fungsional. Antagonisme fungsional mengacu pada situasi di mana satu dampak agonis dinetralkan oleh agonis lain yang bekerja pada sistem sel yang sama tetapi berbeda reseptor. Hubungan antagonis fungsional dan fisiologis serupa. Hubungan antagonis antara dua agonis hadir dalam contoh ini juga, tetapi mereka bekerja pada sistem sel yang berbeda dan

memiliki efek yang berlawanan, menyebabkan efek yang diukur menjadi jumlah dari dua efek.

4.4.2 Sinergisme

Dalam interaksi selama fase pemaparan dan toksikokinetik, banyak efek sinergis terjadi. Misalnya, racun dapat bekerja lebih baik bila dikombinasikan dengan obat yang meningkatkan penyerapan atau mencegah inaktivasi atau ekskresi biokimia. Peningkatan produksi metabolit berbahaya oleh zat yang meningkatkan kapasitas sistem enzim di hati melalui induksi adalah sinergi lain yang juga terjadi selama fase toksikokinetik. Sinergi dalam fase toksikodinamik, bagaimanapun, sebagian besar terdiri dari bahan kimia mutagenik dan karsinogenik.

DAFTAR PUSTAKA

- Bidlack, W. R. 2002. Casarett & Doull's toxicology: the basic science of poisons.
- Brent, J., Burkhart, K., Dargan, P., Hatten, B., Megarbane, B., Palmer, R., & White, J. (Eds.). 2017. *Critical care toxicology: diagnosis and management of the critically poisoned patient*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Dewata, I., & Danhas, Y. H. 2021. Toksikologi Lingkungan: Konsep dan Aplikatif.
- Ernest, H. 2010. A textbook of modern toxicology.
- Luch, A. (Ed.). 2012. *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: Environmental toxicology* (Vol. 101). Springer Science & Business Media.
- Peters, F. T. 2021. Principles of Forensic Toxicology.
- Sembel, D. T. 2015. *Toksikologi lingkungan*. Penerbit Andi.
- Stine, K. E., & Brown, T. M. (2015). *Principles of toxicology*. Crc Press.
- Taufiqurrahman, M., Faizatun, F., & Setyahadi, S. 2021. Pengembangan Krim Ekstrak Dedak Padi (Rice Bran) dan Susu Kuda Sumbawa sebagai Antihiperpigmentasi. *Jurnal Ilmiah Kesehatan*, 20(3), 127-134.
- Taufiqurrahman, M., & Syafriana, V. 2019. Efektivitas Anti Nyamuk Elektrik Komersial dengan Anti Nyamuk Elektrik dari Ekstrak Etanol Jahe Merah (*Zingiber officinale* Roscoe) Terhadap *Aedes aegypti*. *SAINSTECH FARMA*, 12(2), 93-100.

BAB 5

DAMPAK SENYAWA PENCEMAR DI LINGKUNGAN BIOTIK DAN ABIOTIK

Oleh Ayusti Dirga

5.1 Pendahuluan

Lingkungan sangat penting dalam proses kehidupan manusia yang terdiri dari berbagai variabel dan zat yang kompleks. Lingkungan terdiri dari banyak hal berbeda yang dapat membentuk lingkungan dan berdampak, baik secara langsung maupun tidak langsung, pada kehidupan manusia dan komunitas di lokasi tertentu. Lingkungan juga dapat diartikan sebagai kesatuan antara komponen biotik (hidup) dan abiotik (mati). Komponen biotik mencakup produsen, konsumen dan dekomposer (pengurai). Sedangkan komponen abiotik meliputi udara, air, tanah, cahaya matahari, kelembapan, suhu dan lainnya. Komponen biotik dan abiotik sangatlah erat kaitannya dan tidak dapat dipisahkan.

Pencemaran lingkungan bukan sebuah fenomena, namun sebuah fakta yang setiap hari kita jumpai. Pencemaran lingkungan juga merupakan suatu kondisi lingkungan yang memberikan dampak negatif terhadap makhluk hidup yang disebabkan oleh manusia. Perilaku manusia yang tidak pernah

berhenti untuk meningkatkan teknologi hanya menambah komplekstitas permasalahan lingkungan secara keseluruhan. Sering kali manusia telah melampaui batas dan gagal dalam melakukan pemeliharaan lingkungan sampai masalah lingkungan membesar dan meningkat setiap hari serta dari tingkat lokal ke tingkat global. Sumber pencemaran juga bukan hanya berasal dari perilaku manusia, namun keberadaannya dapat terjadi secara alamiah atau disebabkan oleh alam (misal gas alam beracun dan gunung meletus). Sehingga dampak terhadap lingkungan yang ditimbulkan kadang kala tidak dapat diatasi dengan cepat.

5.2 Lingkungan Biotik dan Abiotik

Lingkungan terdiri atas dua komponen penting, yaitu komponen biotik dan komponen abiotik. Kedua komponen tersebut saling berinteraksi satu sama lain membentuk sebuah ekosistem.

5.2.1 Komponen Biotik

Komponen biotik adalah segala sesuatu yang hidup atau bernyawa, seperti tumbuhan, hewan, manusia, dan mikroorganisme (virus, bakteri). Berdasarkan pada fungsi dan perannya, komponen biotik juga dapat dibedakan menjadi empat yaitu :

1. Produsen

Produsen merupakan organisme yang bisa menyusun zat anorganik menjadi organik sebagai makanannya sendiri. Sehingga produsen dikatakan sebagai komponen biotik dengan tingkatan teratas. Pada umumnya, organisme yang bertindak sebagai produsen seperti

organisme autotrof seperti tumbuhan hijau yang memiliki klorofil. Selain itu, yang termasuk dalam komponen biotik produsen yaitu fitoplankton, tumbuhan protista yang ada di dalam perairan, alga, lumut, ganggang hijau dan biru, dan jenis bakteri tertentu.

2. Konsumen

Berbeda dengan produsen, konsumen merupakan organisme heterotrof yang tidak dapat membuat makanannya sendiri dan bergantung dengan makhluk hidup lainnya seperti manusia, jamur dan mikroba, dan hewan. Komponen biotik konsumen terbagi atas herbivora (pemakan tumbuhan), Karnivora (Pemakan daging) dan omnivora (pemakan segala bentuk makanan). Konsumen dan produsen memiliki hubungan yang tidak dapat dipisahkan karena keduanya saling bergantung satu sama lain, sehingga dapat saling mempengaruhi keberlangsungan hidup masing-masing.

3. Dekomposer (Pengurai)

Dekomposer merupakan organisme yang memperoleh makanan dan menguraikan sampah-sampah atau sisa-sisa makanan dari makhluk hidup lain yang telah mati. Selain berperan sebagai pengurai, dekomposer juga dapat berperan untuk mendaur ulang kembali zat organik yang telah terurai membentuk zat hara yang dapat dimanfaatkan kembali oleh produsen. Biasanya, organisme yang termasuk dalam komponen biotik dekomposer berada di tanah, udara, air dan memiliki bentuk yang sangat kecil. Contoh dekomposer adalah jamur dan bakteri.

4. Detrivora

Detrivora adalah organisme heterotrof yang berperan dalam proses penguraian zat organik menjadi zat anorganik yang kemudian dapat diolah kembali oleh produsen. Komponen biotik detrivor seperti siput, cacing tanah, lipan, keluwing, teripang dan kutu kayu.

5.2.2 Komponen Abiotik

Komponen abiotik adalah komponen fisik dan kimiawi yang terdapat pada suatu ekosistem sebagai medium atau substrat untuk berlangsungnya suatu kehidupan. Komponen abiotik meliputi :

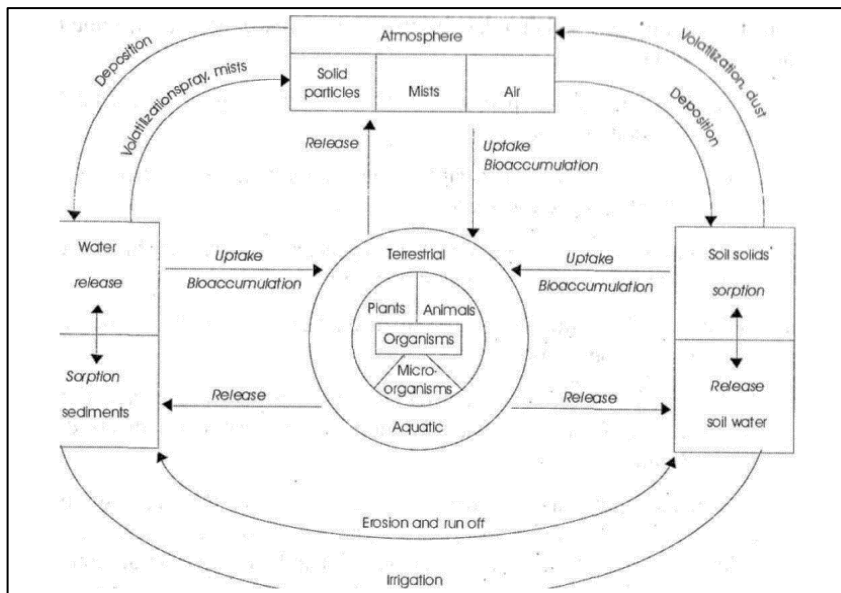
1. Udara,
2. Air,
3. Tanah,
4. Garam mineral,
5. Sinar matahari,
6. Suhu dan kelembapan,
7. Derajat keasaman (pH).

5.3 Dampak Pencemaran Terhadap Lingkungan

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menjelaskan bahwa pencemaran lingkungan hidup merupakan masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan.

Pencemaran lingkungan yang tidak disengaja akan mempengaruhi ekosistem atau sentimen lingkungan yang ada. Karena polusi akan mengubah keadaan yang dulunya baik menjadi buruk. Akan ada banyak gangguan—bagi manusia, hewan, dan tumbuhan—ketika ada polusi. Flora dan fauna sangat menderita akibat pencemaran lingkungan. Beberapa jenis flora dan fauna hidup akan mati jika polutan masuk ke lingkungan. Kesuburan tanah akan meningkat akibat pencemaran lingkungan. Penggunaan insektisida yang berlebihan menjadi penyebab penurunan ini. Insektisida ini akan mencemari tanah jika digunakan secara berlebihan.

Cara utama bahan kimia dipisahkan (dipertukarkan) adalah melalui komponen atau organisme biotek, lingkungan darat, air, dan perairan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 di atas. Siklus polutan juga menunjukkan bahwa manusia adalah salah satu organisme yang melepaskan polutan ke lingkungan, terutama sebagai produk limbah dari proses biokimianya sendiri.



Gambar 5.1 Siklus Bahan Pencemar dalam Lingkungan biotik dan abiotik (Irianto, 2015)

5.3.1 Pencemaran Udara

Udara adalah salah satu hal terpenting yang dibutuhkan semua makhluk hidup untuk bertahan hidup. Bayangkan apa yang akan terjadi jika tidak ada apa pun di dunia ini—semua orang akan mati karena kekurangan oksigen. Kehadiran satu atau lebih zat fisik, kimia, atau biologi dalam jumlah yang mengancam kesehatan manusia, hewan, atau tumbuhan, mengganggu estetika dan kenyamanan, atau menyebabkan kerusakan properti dikenal sebagai polusi udara. Selain itu, udara memegang peranan penting bagi semua makhluk hidup, termasuk manusia. Sehingga, manusia sebagai makhluk yang

berakal harus bertanggung jawab atas kesehatan dan kebersihan udara itu sendiri.



Gambar 5.2 Ilustrasi Pencemaran udara yang bersumber dari Industri (Sumber : Fa'izah, 2020)

Sumber pencemaran udara dapat berasal dari :

1. Proses Alami

Proses alami menyebabkan pembentukan dan emisi berbagai polutan. Gunung berapi yang meletus mengeluarkan partikel serta gas seperti sulfur dioksida, hidrogen sulfida, dan metana ; awan seperti itu mungkin tetap mengudara untuk jangka waktu yang lama. Kebakaran hutan dan padang rumput menghasilkan polutan dalam jumlah besar dalam bentuk asap, hidrokarbon yang tidak terbakar, CO_2 , nitrogen oksida, dan abu. Badai debu adalah sumber umum partikel di banyak bagian dunia, dan lautan menghasilkan aerosol dalam bentuk partikel garam. Tumbuhan dan pepohonan adalah sumber utama hidrokarbon di planet ini, dan kabut biru yang sangat familiar di kawasan hutan pegunungan

terutama berasal dari reaksi atmosfer dengan bahan organik yang mudah menguap yang diproduksi oleh pepohonan. Tumbuhan juga menghasilkan serbuk sari dan spora, yang menyebabkan masalah pernapasan dan reaksi alergi.

2. Perilaku Manusia

Pencemaran udara akibat perilaku manusia dapat berasal dari tiga sumber:

a. Proses pembakaran bahan bakar fosil

Bahan bakar fosil digunakan untuk pemanas dan listrik, atau emisi gas buang dari kendaraan transportasi yang menggunakan bahan bakar bensin atau solar. Senyawa pencemar utama dari pembakaran adalah abu terbang, asap, belerang, dan nitrogen oksida, serta CO dan CO₂. Pembakaran batu bara dan minyak, keduanya mengandung belerang dalam jumlah yang signifikan, menghasilkan oksida belerang dalam jumlah besar. Salah satu dampak dari produksi sulfur oksida adalah terbentuknya endapan asam, termasuk hujan asam. Nitrogen oksida dibentuk oleh oksidasi termal nitrogen atmosfer pada suhu tinggi. Dengan demikian, hampir semua proses pembakaran akan menghasilkan nitrogen oksida. Karbon monoksida adalah produk dari pembakaran tidak sempurna, semakin efisien pembakaran, semakin tinggi rasio CO₂ terhadap CO.

Sumber transportasi, khususnya mobil, merupakan sumber utama polusi udara dan termasuk asap, partikel timbal dari aditif timbal tetraetil, CO₂,

nitrogen oksida, hidrokarbon, dan baru-baru ini, logam golongan platina, yang digunakan dalam konverter katalitik mobil. Sejak pertengahan 1960-an, telah terjadi kemajuan yang signifikan dalam mengurangi emisi gas buang, khususnya dengan penggunaan bensin rendah timbal atau tanpa timbal serta penggunaan bahan bakar beroksigen — misalnya, bahan bakar yang mengandung etanol atau metil t-butil eter (MTBE).

b. Proses industri (Penambangan dan pengeboran)

Industri dapat mengeluarkan berbagai polutan yang berkaitan dengan proses pembuatannya seperti asam (sulfat, asetat, nitrat, dan fosfat); pelarut dan resin; gas (klorin dan amonia); dan logam (kadmium, tembaga, timah, dan seng).

3. Senyawa Pencemar dalam ruangan

Secara umum, istilah polusi udara dalam ruangan mengacu pada rumah dan bangunan publik nonpabrik seperti gedung perkantoran dan rumah sakit, dan mengakibatkan kontaminasi yang sering disebut sebagai "*sick building syndrome*". Polusi dapat berasal dari pemanasan dan memasak, pestisida, asap tembakau, radon, gas, dan yang paling umum, mikroba seperti bakteri dan jamur (jamur) yang tumbuh di struktur atau sistem pemanas dan pendingin karena kelembapan yang berlebihan. Meskipun polusi udara dalam ruangan telah meningkat di negara maju karena konstruksi bangunan yang lebih ketat dan penggunaan bahan bangunan yang dapat mengeluarkan bahan kimia gas, polusi udara dalam

ruangan merupakan masalah khusus di negara berkembang. Kayu, sisa tanaman, kotoran hewan, dan bentuk lain dari biomassa digunakan secara ekstensif untuk memasak dan memanaskan — seringkali di ruangan yang berventilasi buruk. Khususnya untuk wanita dan anak-anak, hal ini menyebabkan paparan polutan udara yang tinggi seperti CO₂ dan hidrokarbon aromatik polisiklik.

5.3.2 Pencemaran Tanah

Selain menjadi tempat sebagian besar produksi makanan, tanah adalah penerima polutan dalam jumlah besar, seperti partikel dari cerobong asap pembangkit listrik. Pupuk, pestisida, dan beberapa bahan lain yang diterapkan ke tanah sering berkontribusi terhadap polusi air dan udara. Oleh karena itu, tanah merupakan komponen kunci dari siklus kimia lingkungan. Ini adalah bagian berharga dari modal alam bumi. Tanah itu sendiri dapat menjadi polutan bagi udara atau air, terutama jika telah disalahgunakan oleh praktik pertanian yang buruk, penggundulan hutan, atau penggurunan. Partikel-partikel tanah halus yang tersapu ke sungai dan badan air oleh erosi air dapat diendapkan sebagai sedimen yang dapat merugikan perairan.

Tanah menerima sejumlah besar produk limbah. Sebagian besar belerang dioksida yang dihasilkan dalam pembakaran bahan bakar yang mengandung belerang berakhir sebagai sulfat tanah. Nitrogen oksida atmosfer diubah menjadi nitrat di atmosfer, dan nitrat akhirnya disimpan di tanah. Tanah menyerap NO dan NO₂, dan gas ini dioksidasi menjadi

nitrat dalam tanah. Karbon monoksida diubah menjadi CO_2 dan mungkin menjadi biomassa oleh bakteri tanah dan jamur. Timbal partikulat dari knalpot mobil ditemukan pada tingkat yang lebih tinggi di tanah di sepanjang jalan raya yang sering dilalui. Kadar timbal yang tinggi juga dapat ditemukan pada daerah tambang dan peleburan timah.

Tumpukan limbah domestik berpotensi mengganggu atau mencemari karena: bau, lindi (pencemar udara), dan estetika. Ditambah lagi, tumpukan sampah menutupi tanah, sehingga tidak memungkinkan untuk menggunakan tanah tersebut. Adanya merkuri, kromium, dan arsen di TPA dapat menyebabkan pencemaran tanah/gangguan terhadap biota tanah, tanaman, dan kerusakan struktur permukaan dan tekstur tanah. Selain itu, tumpukan sampah dapat menghasilkan gas nitrogen dan asam sulfat. Oksida logam, yang dapat ditemukan di dalam tanah dan tidak beracun, dan limbah lainnya.



Gambar 5.3 Keberadaan sampah domestik sebagai sumber pencemaran (Sumber: Qothrunnada, 2021)

Selain berdampak pada kesehatan organisme, Ekosistem juga dapat dipengaruhi oleh polusi tanah. Bahkan dalam konsentrasi rendah, keberadaan bahan kimia beracun atau berbahaya dapat menyebabkan perubahan kimiawi tanah yang signifikan. Metabolisme mikroorganisme endemis dan arthropoda yang menghuni tanah dapat berubah sebagai akibat dari perubahan tersebut. Hasilnya berpotensi menghilangkan sepenuhnya beberapa spesies utama dari rantai makanan, yang dapat menimbulkan konsekuensi signifikan bagi predator dan tingkat rantai makanan lainnya. Bahkan jika bahan kimia tersebut memiliki efek yang kecil pada makhluk hidup yang lebih rendah, tingkat terendah pada rantai makanan dapat terkontaminasi bahan kimia asing yang pada akhirnya dapat membahayakan makhluk hidup dengan tingkatan yang lebih tinggi. Saat ini, banyak dari efek ini terbukti, termasuk konsentrasi DDT pada burung yang menyebabkan kulit telur menjadi rapuh, peningkatan kematian anak ayam, dan kemungkinan kepunahan spesies tersebut.

Perubahan metabolisme tanaman, yang dapat berdampak negatif pada hasil pertanian, adalah salah satu pengaruh pencemaran tanah terhadap pertanian. Ketika tanaman tidak mampu melindungi lapisan tanah dari erosi, ini dapat memiliki efek tambahan pada konservasi tanaman. Beberapa kontaminan ini memiliki waktu paruh yang panjang, dan dalam kasus lain, kontaminan tanah utama akan menimbulkan bahan kimia turunan.

5.3.3 Pencemaran Air

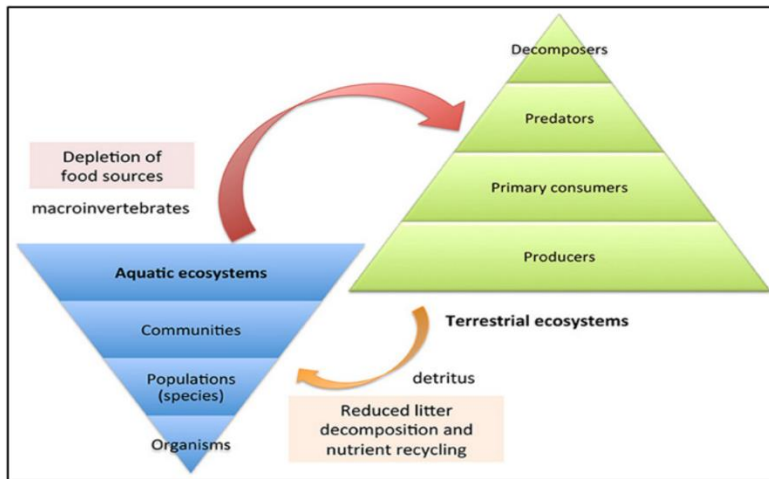
Air sangat penting untuk kelangsungan hidup semua makhluk hidup di planet bumi. Sumber daya air yang terkontaminasi bahan kimia, seperti sungai, danau, air bawah tanah, teluk, dan lautan, beracun bagi makhluk hidup. Danau dan saluran air pesisir tercemar, membuatnya tidak enak untuk dilihat, dicium, dan berenang. Pencemaran air meliputi komponen kimia, biologis, dan fisik. Akibat bahan-bahan tersebut, kualitas air menjadi menurun.



Gambar 5.4 Pencemaran air akibat sampah domestik
(Sumber: Pangestu, 2020)

Polutan dalam air dapat muncul dari dua sumber utama. Dua kategori polusi adalah polusi titik dan polusi non-titik. Suatu jenis polusi di mana sumber kontaminasi kimia mudah diidentifikasi dikenal sebagai polusi titik. Polusi titik terjadi di pabrik, pabrik pengolahan, dan lokasi industri lainnya. Polusi

non-titik, di sisi lain, adalah jenis polusi yang tidak mungkin menentukan sumber kontaminasi kimia. Sumber utama pencemaran air dianggap sebagai aktivitas manusia. Outlet pipa industri, kebocoran jalur pipa, dan tangki penyimpanan semuanya dapat memungkinkan bahan kimia masuk ke badan air. Operasi penambangan juga mencemari pasokan air, baik dengan menggunakan kontaminan kimia di wilayah penambangan selama pemrosesan bijih atau dengan pencucian air melalui batuan yang kaya bahan kimia.



Gambar 5.5 Efek Residu yang terbawa oleh air pada ekosistem
(Sumber : Singh, 2021)

Limbah dalam jumlah besar diproduksi di kota-kota dan dikirim ke badan air melalui kanal, sungai, dan teknik lainnya. Sumber pertanian seperti padang rumput, peternakan, dan tempat penggembukan, serta industri, menghasilkan polutan kimia. Pabrik pengolahan dan pertambangan di sepanjang

pantai, anjungan minyak lepas pantai, dan beberapa kapal yang bocor merupakan penyebab signifikan pencemaran laut. Plastik adalah bahan yang paling berbahaya bagi makhluk laut saat dibuang dan dikonsumsi.

Tabel 5.1 Klasifikasi Umum dari Bahan Pencemar Air dan dampaknya

Jenis Bahan Pencemar	Dampaknya
Unsur-unsur renik	Kesehatan, biota perairan, toksisitas
Logam berat	Kesehatan, biota perairan, toksisitas
Senyawa logam organik	Transportasi logam
Radionuklir	Toksisitas
Polutan anorganik	Toksisitas, biota perairan
Asbes	Kesehatan manusia
Nutrisi Alga	Eutrofikasi
Asiditas, Alkalinitas, Salinitas tinggi	Kualitas air, kehidupan perairan
Zat pencemar organik renik	Toksisitas
PCB	Efek biologis
Pestisida	Toksisitas, biota air, satwa liar
Limbah minyak	Berdampak pada satwa liar, estetika
Limbah cair, manusia, dan hewan	Kualitas air, tingkat oksigen
Kebutuhan oksigen biokimia	Kualitas air, tingkat oksigen
Patogen	Berdampak pada kesehatan
Detergen	Eutrofikasi, satwa liar, estetika
Bahan kimia karsinogenik	Insiden kanker
Sedimen	Kualitas air, biota air, satwa liar
Rasa, Bau, dan Warna	Estetika

Sumber: Manahan, 2010

Dampak pencemaran air pada kesehatan yaitu dengan tingkat racun yang tinggi dapat menyebabkan kanker, kesulitan reproduksi, dan kematian pada manusia di puncak rantai makanan. Methemoglobinemia, sering dikenal sebagai sindrom bayi biru, adalah bentuk anemia yang berpotensi fatal yang disebabkan oleh asupan nitrat yang tinggi dalam air dan makanan bayi. Nitrit, yang diproduksi oleh mikroorganisme mereduksi nitrat di saluran cerna, menyebabkan kondisi ini. Konsumsi nitrat yang berlebihan berpotensi menyebabkan kanker lambung.

Ketika logam berat, seperti pestisida dan herbisida, menumpuk dalam konsentrasi besar di dalam tubuh, mereka dapat menimbulkan masalah kesehatan jangka panjang. Dalam hal ini, mengonsumsi tanaman dan sayuran yang sebelumnya menyerap kadmium dalam jumlah besar dari pupuk organik, terutama limbah, dapat mengakibatkan kerusakan organ. Toksisitas timbal juga dapat menyebabkan masalah mental. Kemungkinan memakan ikan dan kerang yang dikumpulkan di saluran air yang terkontaminasi tidak aman. Orang bisa sakit dengan meminum air yang tidak bersih, dan paparan jangka panjang dapat menyebabkan kanker atau kelahiran anak dengan cacat lahir. Polutan dari industri dapat mempengaruhi satwa liar, tumbuhan, dan manusia ketika polutan tersebut mengalir ke saluran air, sungai, atau danau.

DAFTAR PUSTAKA

- Fa'izah, A.Z., 2020, *Penyebab Pencemaran Udara dan Cara Mengatasinya*. Merdeka.com. dilihat 20 Desember 2022.
<https://www.merdeka.com/trending/penyebab-pencemaran-udara-dan-5-cara-mengatasinya-klm.html>
- Ferdinan, F. dan Ariebowo, M. 2009. *Praktis Belajar Biologi*. PT Grafindo Media Pratama. Bandung
- Hodgson, E., 2010, *A Textbook Of Modern Toxicology*, 4th ed, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada
- Irianto, I.K. 2015. *Buku Bahan Ajar Pencemaran Lingkungan*. Fakultas Pertanian Universitas Warmadewa. Bali
- Khoiyangbam, R.S., and N Gupta. 2012. *Introduction to Environmental Sciences*. New Delhi: TER
- Manahan, S.E. 2010, *Environmental chemistry* 9th ed. CRC Press. United States of America
- Muslimah, 2015, 'Dampak Pencemaran Tanah Dan Langkah Pencegahan', *Agrisamudra*, vol. 2, no. 1, hal. 11-20
- Qothrunnada, K. 2021. *Pencemaran Lingkungan: Pengertian, Jenis, dan Penyebab Terjadinya*. Detikcom. dilihat 23 Desember 2022.
<https://www.detik.com/edu/detikpedia/d-5765860/pencemaran-lingkungan-pengertian-jenis-dan-penyebab-terjadinya>.
- Pangestu, A.B. 2020. *Contoh Pencemaran Air Beserta Dampak dan Cara Menanggulangi*. 99co. dilihat 24 Desember 2022.
<https://www.99.co/id/panduan/contoh-pencemaran-air>
- Sembel, D.T. 2015. *Toksikologi Lingkungan*. Yogyakarta: ANDI

Singh, G., Bhadouria, J., Rai, S., dan Jadon, N. 2021. Impact of Contaminants on Ecosystems and Biotic Indices. dilihat 22 Desember 2022.
https://www.researchgate.net/publication/356833779_Impact_of_Contaminants_on_Ecosystems_and_Biotic_Indices

BAB 6

BERBAGAI BENTUK TOKSISITAS DI UDARA DAN PENYEBARANNYA

Oleh Rahmawati

6.1 Pendahuluan

Pada zaman sekarang ini semakin banyak bahan kimia (toksikan) yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Pada awalnya manusia menggunakan berbagai jenis toksikan tanpa mengetahui efek buruk dari masing-masing toksikan yang digunakan, seperti asbes, formaldehid, benzen, dan vinil klorida (Kurniawidjaja, *et al.*, 2021).

Penurunan kualitas lingkungan mungkin melalui perubahan-perubahan kimiawi, fisika, dan biologis melalui modifikasi terhadap sifat fisik dan perilaku biologis udara, karena pengaruh oleh kegiatan industri, pertanian dan kegiatan sosial manusia. Secara nyata bahwa kegiatan manusia akan terus berlanjut memerlukan jumlah bahan bakar yang bertambah, bahan kimia industri, pestisida, dan produk lainnya akan terus berlanjut menghasilkan produk limbah. Limbah gas akan sangat cepat terdistribusi menuju udara (atmosfer) selanjutnya akan terlarutkan oleh titik-titik air dan terbawa kembali ke bumi bersama hujan (Yulianto & Amaloyah, 2017).

Dalam bernafas manusia menghisap udara dengan mengambil oksigen dan menghembuskan karbondioksida kembali ke udara. Udara merupakan kombinasi dari berbagai macam gas yang perbandingannya tidak tetap, tergantung pada keadaan suhu udara, tekanan udara, dan lingkungan sekitarnya. Udara juga merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem atmosfer berada di sekeliling bumi yang fungsinya sangat penting bagi kehidupan di permukaan bumi (Prabowo & Muslim, 2018).

Udara merupakan komponen lingkungan yang penting dalam kehidupan, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan dan peningkatan kualitas udara. Kualitas udara dari satu daerah ditentukan oleh daya dukung alam serta jumlah sumber pencemaran yang ada di daerah tersebut. Udara yang setiap saat dihirup oleh manusia ketika bernafas merupakan udara ambien yang berada di lingkungan sekitar. Udara ambien merupakan udara bebas di permukaan bumi yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup dan perubahan iklim global secara langsung maupun tidak langsung (Wardoyo, 2016).

Lingkungan atmosfer terdiri dari campuran gas meliputi ketebalan 10-16 km dari permukaan bumi. Komponen atmosfer terdiri dari oksigen (21%), nitrogen (78%), karbon dioksida (0.03%), argon (<1%), serta gas lainnya dan uap air. Jumlah uap air yang terdapat terdapat di udara bervariasi tergantung dari cuaca dan suhu, sekitar 0.01% di daerah subtropis, dan sekitar 5% di daerah tropis yang lembab. Pencemaran udara merupakan peristiwa masuknya polutan ke dalam lapisan udara (atmosfer) menyebabkan perubahan

susunan atau komposisi normal udara sehingga mengakibatkan penurunan kualitas udara di lingkungan. Ada beberapa polutan yang dapat menyebabkan pencemaran udara seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), karbon dioksida (CO₂), hidrokarbon (HC), dan partikel (Irianti, *et al.*, 2017).

Atmosfer bumi ditentukan oleh kualitas udara yang mengelilinginya. Fungsi utama atmosfer dalam menopang kehidupan di permukaan bumi untuk mencegah pemanasan dan pendinginan suhu bumi, serta menyediakan gas-gas tertentu bagi kehidupan organisme. Apabila terjadi perubahan komposisi gas-gas yang ada di atmosfer bumi dapat mengakibatkan gangguan kenyamanan, kesehatan manusia, gangguan terhadap tumbuhan dan binatang, serta gangguan iklim. Perubahan komposisi gas-gas di atmosfer terjadi karena pencemaran udara dari industri dan kendaraan bermotor, apabila tidak dikendalikan maka akan menyebabkan penurunan kualitas udara atmosfer bumi (Prabowo & Muslim, 2018).

Sumber pencemaran udara yang utama berasal dari transportasi terutama kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar mengandung zat pencemar, 60% zat pencemar yang dihasilkan terdiri dari karbon monoksida dan sekitar 15% terdiri dari hidrokarbon. Sumber-sumber pencemar lainnya berupa hasil pembakaran, proses industri, pembuangan limbah, dll. Pada beberapa daerah perkotaan, kendaraan bermotor menghasilkan 85% dari seluruh pencemaran udara yang terjadi. Kendaraan bermotor merupakan pencemar

bergerak yang menghasilkan pencemar CO, hidrokarbon yang tidak terbakar sempurna, NO_x, SO_x, dan partikel.

Polutan udara dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu polutan udara primer dan sekunder. Polutan udara primer merupakan suatu bahan kimia yang ditambahkan langsung ke udara yang menyebabkan peningkatan konsentrasi dan membahayakan. Polutan udara primer dapat berupa komponen udara alamiah, seperti karbondioksida yang konsentrasinya dapat mengalami peningkatan sampai di atas keadaan normal atau sesuatu yang tidak biasanya terdapat di udara seperti senyawa timbal (Pb). Polutan udara sekunder merupakan senyawa kimia berbahaya yang terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia diantaranya berbagai komponen di udara. Misalnya kabut fotokimia (Yulianto & Amaloyah, 2017).

Komponen-komponen polutan di udara dalam tingkat tertentu dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan paru manusia atau hewan, tanaman, bangunan, dan bahan lainnya. Adanya kandungan bahan kimia dalam atmosfer bumi karena polutan dapat mengubah iklim lokal, regional dan global, sehingga bisa meningkatkan jumlah radiasi sinar ultraviolet dari matahari ke permukaan bumi (Irianto, 2015).

6.2 Sumber Toksisitas Di Udara

Polusi udara dapat terjadi diawali dengan terbentuknya emisi. Emisi merupakan jumlah polutan atau pencemar yang dikeluarkan ke udara dalam satuan waktu. Emisi dapat disebabkan oleh proses alam maupun kegiatan manusia. Emisi yang diakibatkan oleh proses alam disebut *biogenic emissions*

dapat berupa dekomposisi bahan organik oleh bakteri pengurai yang menghasilkan gas metan (CH_4). Sedangkan emisi yang disebabkan oleh kegiatan manusia disebut *anthropogenic emissions* berupa hasil pembakaran bahan bakar fosil, pemakaian zat-zat kimia yang disemprotkan ke udara, dsb (Sastrawijaya, 2000).

6.2.1 Sumber Alamiah

1. Akibat Kebakaran Hutan

Beberapa jenis polutan dari kebakaran hutan yang dapat mencemari udara seperti hidrokarbon, karbon dioksida, senyawa sulfur oksida, senyawa nitrogen oksida, dan nitrogen dioksida. Adapun bahan pencemar berbentuk partikel adalah asap berupa partikel karbon yang sangat halus bercampur dengan debu hasil dari proses pemecahan suatu bahan.

Kebakaran hutan yang terdiri dari kayu-kayu pohon yang terbakar menghasilkan asap yang pekat. Asap tersebut dapat mengandung unsur CO dari hasil pembakaran lahan hutan serta asap yang terbawa oleh angin dan mengganggu penduduk atau masyarakat di lingkungan sekitarnya. Selain itu, negara tetangga juga terkena dampak kebakaran hutan.

2. Akibat Letusan Gunung Api

Kegiatan alam yang dapat menyebabkan polusi udara diantaranya adalah kegiatan letusan gunung berapi. Salah satu gas pencemar yang dihasilkan oleh gunung berapi adalah SO_x . Bentuk material letusan gunung berapi yaitu awan panas dan abu vulkanik yang dapat mengotori udara

dan sangat berbahaya jika terhirup oleh manusia. Kandungan logam berupa timah, besi, dan seng dapat merusak paru-paru dan menyebabkan iritasi pada mata. Letusan gunung berapi sangat dahsyat dan dapat memberikan efek terhadap iklim global.

6.2.2 Sumber Kegiatan Manusia

Sumber antropogenik yang berhubungan dengan proses pembakaran berbagai jenis bahan bakar, yaitu :

1. Sumber Tidak Bergerak
 - a. Sumber titik, yaitu sumber pada titik tetap, seperti cerobong asap atau tangki penyimpanan yang dapat mengeluarkan polutan udara. Industri modern di kota-kota besar mempunyai cerobong asap yang dapat mengeluarkan asap dari hasil proses produksi. Asap-asap tersebut akan naik ke lapisan atmosfer dan dapat menimbulkan terjadinya hujan asam yang berbahaya bagi kehidupan makhluk hidup.
 - b. Sumber area, merupakan serangkaian sumber-sumber kecil yang bersama-sama dapat mempengaruhi kualitas udara di suatu daerah. Misalnya pembakaran bahan bakar di rumah tangga, kebakaran hutan, TPA, jalan tidak beraspal, dan konstruksi pembangunan.

Sumber polusi dari bahan bakar bersumber menetap merupakan pembakaran beberapa jenis bahan bakar yang diemisikan pada suatu lokasi yang tetap. Berbeda dengan sarana transportasi, sumber polusi udara menetap, mengemisikan polutan pada udara ambien tetap, sehingga

dalam pengelolaan lingkungan perlu perencanaan yang matang, misalnya dengan mempertimbangkan keadaan geografi, topografi, meteorologi, serta rencana tata ruang wilayah.

2. Sumber Bergerak
 - a. Sumber *on-road* (bergerak di jalan), misalnya : mobil, motor, metromini, bis kota, dsb.
 - b. Sumber *non-road* (bergerak bukan di jalan), misalnya : kapal laut, kereta api, pesawat terbang, dll.
3. Debu zalt kimial malupun palrtikel-palrtikel sebalgali halsil dalri industri pertalnialn daln perkebunaln
4. Alsalp dalri penggunalaln calt, halir spraly, daln jenis pelalrut lalinnyal
5. Gals yalng dihal silkaln dalri proses pembualngaln alakhir di TPAI, dalpalt berupal gals metaln
6. Perallaltaln militer, misallnyal: senjaltal nuklir, senjaltal biologis, gals beralcun, daln roket (Prabowo & Muslim, 2018).
7. Substalnsi raldioalktif seperti : raldon-222, iodin-131, strontium-90, plutonium-239, daln raldioisotop lalinnyal yalng malsuk ke altnosfer bumi dallalm bentuk gals altalu suspensi palrtikel.
8. Palnals seperti energi palnals yalng dikelualrkaln paldal walktu terjaldi proses perubalhn bentuk, terutalmal salalt terjaldi pembalkalraln minyalk paldal kendalralaln, palbrik, daln pembalngkit tenalgal listrik (Irianto, 2015).



Gambar 6.1 Sumber Polusi Udara,

a. Industri/pabrik, b. Kendaraan bermotor, c. Kebakaran hutan

(Sumber : community.meststrade.com/2014/04/ECA_Area)

6.3 Jenis-Jenis Toksisitas Di Udara

Ada beberapa polutan yang dapat menyebabkan polusi udara, antara lain: karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), hidrokarbon (HC), dan partikel. Partikel-partikel halus terutama berbentuk kabut yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar secara tidak sempurna, sedangkan partikel-partikel kasar terutama berbentuk senyawa organik. Senyawa SO₂, asap dan debu dapat berfungsi sebagai *prototype* senyawa pencemar udara yang lain.

Tabel 6.1 Parameter Pencemar Udara

No.	Parameter	Udara Bersih	Udara Tercemar
1	CO	< 1 ppm	5 – 200 ppm
2.	CO ₂	310 – 330 ppm	350 – 700 ppm
3.	NO ₂	0.003 – 0.02 ppm	0.02 – 0.1 ppm
4.	SO ₂	0.003 – 0.02 ppm	0.02 – 2 ppm
5.	Hidrokarbon	< 1 ppm	1 – 20 ppm
6.	Partikulat	0.01 – 0.02 mg/m ³	0.07 – 0.7 mg/m ³

Sumber: (Irianti, *et al.*, 2017)

Polutan yang berupa gas maupun partikulat dapat dibagi menjadi dua yaitu polutan primer dan sekunder. Polutan primer merupakan polutan yang berasal dari emisi langsung ke atmosfer dari sumber emisi. Misalnya karbon monoksida, nitrogen oksida, maupun partikulat dengan berbagai ukuran. Sedangkan polutan sekunder merupakan polutan yang dihasilkan oleh reaksi kimia dengan polutan lainnya (Vallero, 2014). Bahan polutan udara atau polutan berdasarkan asalnya dibagi menjadi dua bagian:

1. Polutan primer, merupakan polutan yang dikeluarkan langsung dari sumber tertentu, dan dapat berupa:
 - a. Polutan gas, terdiri dari senyawa karbon yaitu hidrokarbon, hidrokarbon teroksigenasi, dan karbon oksida (CO atau CO_2); senyawa sulfur yaitu sulfur oksida; senyawa nitrogen yaitu nitrogen oksida dan amoniak; senyawa halogen yaitu flour klorin, hidrogen klorida, hidrokarbon terklorinasi, dan bromin, serta golongan gas berbahaya seperti benzen dan air raksa.
 - b. Partikulat atau partikel, terdapat di atmosfer yang mempunyai karakteristik spesifik, dapat berupa zat padat dan cairan maupun suspensi udara. Partikulat primer dihasilkan oleh proses secara mekanik maupun proses pembakaran.
2. Polutan sekunder, biasanya terjadi karena reaksi dari dua atau lebih bahan kimia di udara, misalnya reaksi fotokimia. Misalnya disosiasi NO_2 yang menghasilkan NO dan O radikal. Proses kecepatan dan arah reaksinya dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti konsentrasi relatif dari bahan reaktan, derajat fotoaktivasi, kondisi iklim, topografi lokal

dan adanya embun. Polutan sekunder mempunyai sifat fisik dan sifat kimia yang tidak stabil. Jenis polutan sekunder seperti ozon, *peroxy acyl nitrat* (PAN), dan formaldehid (Wardoyo, 2016).

Berdasarkan tempat kejadiannya maka polutan di udara dapat dibagi dalam dua kelompok yaitu:

1. Polutan udara dalam ruangan, disebut juga udara tidak bebas seperti di rumah, pabrik, bioskop, rumah sakit, sekolah, dll. Biasanya berasal dari zat pencemar seperti asap yang terjadi dari dapur tradisional ketika memasak, asap rokok, dll.
2. Polutan udara luar ruangan, disebut juga udara bebas seperti asap-asap dari industri maupun kendaraan bermotor.

Berdasarkan gangguan atau efek kesehatan yang dapat ditimbulkan, maka polutan di udara dapat dikelompokkan menjadi empat bagian, yaitu:

1. Iritansi, merupakan zat polutan yang dapat menimbulkan iritasi jaringan tubuh, seperti SO_2 , ozon, dan nitrogen oksida.
2. Aspeksia, merupakan keadaan dengan darah kekurangan oksigen dan tidak mampu melepas karbon dioksida. Gas penyebab tersebut seperti CO , H_2S , NH_3 , dan CH_4
3. Anestesia, adalah zat yang mempunyai efek membius dan biasanya merupakan pencemaran udara dalam ruangan, seperti formaldehid, dan alkohol.

4. Toksis, adalah zat polutan yang menyebabkan keracunan, dengan zat penyebabnya seperti logam timbal, kadmium, flour, dan insektisida.

Sedangkan berdasarkan susunan kimia, maka polutan di udara dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu:

1. Anorganik, adalah zat polutan yang tidak mengandung karbon, seperti asbes, ammonia, asam sulfat, dll.
2. Organik, adalah zat polutan yang mengandung karbon seperti pestisida, herbisida, beberapa jenis alkohol, dll (Irianti, *et al.*, 2017).

6.4 Parameter Toksisitas di Udara dan Penyebarannya

Ada beberapa bentuk toksisitas di udara yang sering ditemukan di kota-kota, seperti:

6.4.1 Partikulat (PM)

Partikel merupakan salah satu bentuk toksisitas di udara yang dapat berada bersama-sama bahan atau bentuk toksikan lainnya. Partikel dapat di artikan secara murni atau sempit sebagai polutan di udara yang berbentuk padat. Tetapi partikel dapat meliputi berbagai jenis bentuk dalam kaitannya dengan masalah pencemaran lingkungan, mulai dari bentuk yang sederhana sampai dengan bentuk yang rumit atau kompleks yang semua itu merupakan pencemaran udara.

Partikel merupakan campuran yang sangat rumit dari berbagai senyawa organik dan anorganik yang terbesar di udara dengan diameter yang sangat kecil, mulai dari < 1 mikron sampai dengan maksimal 500 mikron. Partikel debu

akan berada di udara dalam waktu yang relative lama dalam keadaan melayang-layang di udara dan masuk ke dalam tubuh manusia melalui saluran pernafasan. Partikel pada umumnya mengandung berbagai senyawa kimia yang berbeda dengan berbagai ukuran dan bentuk yang berbeda pula, tergantung sumber emisi.

Sumber pencemaran partikel dapat berasal dari peristiwa alami dan dapat juga berasal dari aktivitas manusia. Pencemaran partikel yang berasal dari alami, dapat berupa debu tanah/pasir yang terbang terbawa oleh angin kencang, abu dan bahan-bahan vulkanik yang terlempar ke udara akibat letusan gunung berapi, dan semburan uap air panas di sekitar daerah sumber panas bumi di pegunungan. Sumber pencemaran partikel dapat berasal dari aktivitas manusia, sebagian besar berasal dari proses industry, pembakaran bahan bakar fosil kendaraan bermotor, badai pasir, pembakaran hutan, serta letusan gunung berapi.

Debu merupakan zat padat yang dihasilkan oleh manusia atau alam dan merupakan hasil dari proses pemecahan suatu bahan. Debu termasuk ke dalam golongan partikulat yang merupakan zat padat/ cair yang halus dan tersuspensi di udara, seperti embun, asap, debu, fog, dan fumes. Partikel debu dapat dibagi atas tiga jenis, yaitu debu organic, debu mineral, dan debu metal. Sumber debu bermacam-macam, tergantung dari jenis debunya. Partikel debu dipengaruhi oleh daya tarik bumi sehingga cenderung untuk mengendap di permukaan bumi. Partikel debu juga dapat membentuk fog sehingga ukurannya menjadi lebih besar permukaannya cenderung untuk basah. Sifat-sifat tersebut

membuat ukuran debu menjadi lebih besar sehingga memudahkan untuk proses pengendapan di permukaan bumi dengan bantuan gaya tarik bumi. Partikel debu dengan diameter 1 millimikron mempunyai kemampuan untuk menghamburkan sinar matahari.

Partikel menyebar di atmosfer akibat dari berbagai proses alami, seperti leusan vulkanik, hembusan debu, serta tanah oleh angin. Aktivitas manusia juga berperan dalam penyebaran partikel, misalnya dalam bentuk partikel debu dan asbes dari bahan bangunan, abu terbang dari proses peleburan baja dan asap dari proses pembakaran tidak sempurna, terutama dari batu arang. Sumber partikel yang utama adalah pembakaran bahan bakar dari sumbernya, lalu diikuti oleh proses-proses industry.

Partikel di atmosfer dalam bentuk suspensi, yang terdiri atas partikel-parikel padat cair. Partikel sebagai polutan udara mempunyai waktu hidup yaitu pada saat partikel masih melayang-layang sebagai polutan di udara sebelum jatuh ke bumi. Sedangkan kecepatan pengendapan partikel tergantung pada ukuran partikel, massa jenis, dan arah angin, serta kecepatan angin bertiup.

Polusi udara oleh partikel berhubungan erat dengan senyawa sulphur dioksida. Partikel sulphur dioksida berasal dari sumber yang sama yaitu pembakaran bahan bakar fosil yang satu sama lain saling bereaksi secara sinergis dalam memberikan dampak terhadap kesehatan manusia. Benda partikel tersebut biasa disebut asap atau jelaga dan merupakan polutan udara yang sangat berbahaya. Sebagian benda partikulat keluar dari cerobong pabrik sebagai asap hitam

tebal, tetapi yang paling berbahaya adalah partikel-partikel halus atau butiran-butiran yang sangat kecil sehingga dapat menembus bagian terdalam paru-paru. Sebagian besar partikel halus ini terbentuk dengan polutan lain terutama sulphur dioksida dan oksida nitrogen dan secara kimiawi berubah dan membentuk zat-zat nitrat dan sulfat.

Berdasarkan lamanya partikel tersuspensi di udara dan rentang ukuran yang dimiliki, maka partikel dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu *dust fall* (*setteable particulate*) dan *suspended particulate matter* (SPM). *Dust fall* merupakan partikel berbentuk lebih besar dari 10 μm . Sedangkan SPM merupakan partikel yang ukurannya lebih kecil dari 10 μm dan dapat berasal dari proses industri dan pembakaran. Partikel yang masuk ke dalam paru-paru dapat membahayakan manusia, Karena:

1. Sifat-kimia dan fisik dari partikel yang mungkin beracun
2. Partikel tersebut bersifat inert
3. Partikel membawa molekul-molekul gas berbahaya dengan cara mengabsorpsi maupun mengadsorpsi yang menyebabkan molekul-molekul gas dapat mencapai dan tertinggal dalam paru-paru yang sensitive.

Partikel yang sangat berbahaya dalam bentuk padat adalah partikel-partikel yang sangat kecil dan halus dan dapat menembus ke dalam paru-paru yang hanya dilindungi oleh dinding tipis setebal molekul. Partikel tersebut biasa disebut PM_{10} karena ukuran partikel tersebut lebih kecil dari 10 mikron. Partikel halus itu kebanyakan berasal dari senyawa sulphur dan nitrogen yang dalam selang waktu berapa jam atau

beberapa hari akan berubah dari gas menjadi zat padat (Prabowo & Muslim, 2018).



Gambar 6.2 Deposisi Kompartemen Partikulat Di dalam Tubuh
(Sumber: (Irianti, *et al.*, 2017))

Partikulat masuk ke dalam system pernafasan melalui hidung dan tenggorokan (nomor 1). Partikulat dengan diameter lebih besar yaitu antara $2.5 - 10 \mu\text{m}$ (nomor 2 dan 3), akan tereliminasi melalui respon alami tubuh seperti bersin dan batuk. Sedangkan partikulat dengan diameter lebih kecil yaitu $< 2.5 \mu\text{m}$ akan terpenetrasi menuju paru-paru, terdistribusi ke alveoli dan dapat menyebabkan beberapa masalah pada system pernafasan bagian bawah serta menyebarkan beberapa zat berbahaya pada aliran darah (Irianti, *et al.*, 2017).

6.4.2 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) merupakan suatu gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan juga tidak berasa. Karbon monoksida terdapat di alam terbentuk dari salah satu proses

yaitu pembakaran tidak lengkap terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon, reaksi antara karbondioksida dan komponen yang mengandung karbon pada suhu tinggi, dan karbon dioksida akan terurai menjadi CO dan O pada suhu tinggi. Gas CO sebagian besar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dengan udara, berupa gas buangan. Selain itu, gas CO dapat pula terbentuk karena aktivitas industry. Sedangkan secara alamiah, gas CO terbentuk sebagai hasil kegiatan gunung berapi, proses biologi, dll walaupun dalam jumlah yang sangat sedikit.

Mekanisme reaksi sederhana dari pembakaran karbon dalam minyak bahan bakar fosil yang dapat terjadi pada tahap berikut:



Sumber: (Prabowo & Muslim, 2018)

Reaksi pertama berlangsung sepuluh kali lebih cepat dari pada reaksi kedua. Oleh karena itu, CO merupakan intermediate pada reaksi pembakaran dan dapat merupakan produk akhir jika jumlah oksigen tidak cukup untuk melangsungkan reaksi kedua. Gas CO juga dapat merupakan produk akhir meskipun jumlah oksigen dalam campuran pembakaran masih cukup, tetapi antara minyak bahan bakar dengan udara tidak tercampur rata. Akibat dari pencampuran yang tidak rata antara minyak bahan bakar dengan udara maka akan menghasilkan beberapa tempat yang kekurangan oksigen. Semakin rendah perbandingan keduanya maka semakin tinggi jumlah karbon monoksida yang dihasilkan.

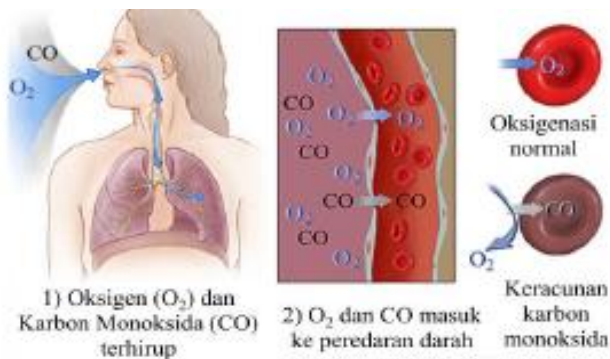
Penyebaran gas CO di udara tergantung pada keadaan lingkungan. Daerah perkotaan yang banyak kegiatan industri dan lalu lintas padat, maka udara sudah banyak yang tercemar oleh gas CO. Sedangkan daerah pedesaan, terbentuknya cemaran CO di udara relative kecil. Salah satu upaya yang dapat membantu penyerapan gas CO seperti tanah yang masih terbuka dan belum ada bangunan di atasnya. Hal ini dapat disebabkan oleh mikroorganisme yang ada dalam tanah mampu menyerap gas CO yang terdapat di udara. Angin juga dapat mengurangi konsentrasi gas CO pada suatu tempat karena dipindahkan ke tempat lain.

Konsentrasi CO di udara ada tempat tertentu dipengaruhi oleh kecepatan emisi (pelepasan) CO di udara dan kecepatan disperse, serta pemberishan CO di udara. Pada daerah perkotaan kecepatan pembersihan CO dari udara sangat lambat, oleh karena itu kecepatan dispersi dan pembersihan CO di udara sangat menentukan konsentrasi CO di udara. Kecepatan dispersi dipengaruhi langsung oleh faktor-faktor meteorologi seperti kecepatan dan arah angin, turbulensi udara, dan stabilitas atmosfer. Pada daerah perkotaan, meskipun turbulensi ditimbulkan karena adanya kendaraan yang bergerak dan aliran udara di atas dan di sekeliling bangunan, tetapi karena keterbatasan ruangan maka gerakan udara sangat terbatas sehingga konsentrasi CO di udara dapat meningkat (Prabowo & Muslim, 2018).

Dalam proses industri, karbon monoksida digunakan dalam jumlah kecil. Gas ini dihasilkan dari pembakaran material dengan kandungan karbon seperti bensin, gas alam, batu bara, dll. Karbon monoksida sebenarnya merupakan

produk yang tidak diinginkan dalam proses pembakaran. Pembuangan asap kendaraan bermotor mengandung 9% karbon monoksida. Pada daerah perkotaan dengan tingkat kemacetan kendaraan yang tinggi, maka tingkat bahaya terhadap kasus keracunan juga tinggi. Selain itu asap rokok juga mengandung gas CO, pada orang dewasa tidak merokok biasanya terbentuk karboksi hemaglobin tidak lebih dari 1%, tetapi pada perokok aktif biasanya lebih tinggi, yaitu 5 – 10%. Pada wanita hamil perokok, gas CO dapat membahayakan janin.

Keberadaan gas CO sangat berbahaya apabila terhirup oleh manusia karena akan menggantikan posisi oksigen untuk berikatan dengan haemoglobin dalam sel darah seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.3 sebagai berikut:



Gambar 6.3 Gas CO Menggantikan Posisi Oksigen dalam Darah
(Sumber: (Irianti, *et al.*, 2017))

Gas CO akan mengalir ke dalam jantung, otak serta organ vital, sehingga dapat menjadi sangat fatal. Dengan

demikian, maka oksigen akan kalah bersaing dengan CO saat berikatan dengan molekul haemoglobin, sehingga kadar oksigen dalam darah akan berkurang, padahal oksigen sangat diperlukan untuk melakukan fungsi metabolisme oleh sel-sel dan jaringan tubuh. Selanjutnya gas CO akan menghambat aktivitas oksidasi sitokrom, sehingga menyebabkan respirasi intraseluler menjadi kurang efektif. Pada akhirnya gas CO akan dapat berikatan secara langsung dengan sel otot jantung dan tulang. Oleh karena itu, maka akan terjadi efek yang paling serius seperti keracunan secara langsung terhadap sel-sel dan juga menyebabkan gangguan pada system saraf.

Batas pemaparan gas CO yang diperbolehkan oleh OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) adalah 35 ppm untuk waktu 8 jam / hari kerja. Kadar yang dianggap langsung berbahaya terhadap kehidupan atau kesehatan adalah 1500 ppm (0.15%). Paparan dari 1000 ppm (0.1%) selama beberapa menit dapat menyebabkan 50% haemoglobin menjadi karboksi haemoglobin.

Tabel 6.2 Pengaruh Konsentrasi CO terhadap Kesehatan

Konsentrasi CO di Udara (ppm)	Konsentrasi COHb dalam darah (%)	Gangguan Kesehatan
3	0.98	Tidak ada
5	1.3	Belum begitu terasa
10	2.1	Sistem syaraf sentral
20	3.7	Panca indra
40	6.9	Fungsi jantung
60	10.1	Sakit kepala
80	13.3	Sulit bernafas
100	16.5	Pingsan - kematian

Sumber: (Wardoyo, 2016)

Gejala akibat keracunan gas CO didahului dengan saki kepala, mual, muntah, rasa lelah, pernafasan meningkat, kebingungan, berkeringat banyak, hipotensi, gangguan penglihatan, saki dada mendadak, bahkan kehilangan kesadaran. Kematian kemungkinan disebabkan oleh sulit bernafas dan edema paru. Kematian akibat sulit bernafas disebabkan oleh kurangnya oksigen pada tingkat seluler. Sel darah tidak hanya mengikat oksigen karena mempunyai ikatan lebih kuat terhadap karbon monoksida dari pada oksigen, sehingga jika terdapat CO dan O₂, maka sel darah merah akan cenderung berikatan dengan karbon monoksida ((BPOM), 2015).

6.4.3 Nitrogen Oksida (NO_x)

Nitrogen oksida sering disebut NO_x karena oksida nitrogen mempunyai dua bentuk yang sifatnya berbeda, yaitu gas NO₂ dan NO, meskipun ada bentuk oksida nitrogen lainnya, tetapi kedua gas tersebut yang paling banyak diketahui sebagai polutan di udara. Gas NO terdapat di udara dalam jumlah besar dari pada NO₂. Pembentukan NO dan NO₂ merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara, sehingga membentuk NO, yang bereaksi lebih lanjut dengan lebih banyak oksigen membentuk NO₂ (Wardhana, 2004).

Seperti halnya CO, emisi nitrogen oksida dipengaruhi oleh kepadatan penduduk karena sumber utama NO_x yang diproduksi manusia adalah pembakaran yang disebabkan oleh kendaraan bermotor, produksi energy dan pembuangan sampah. Sebagian besar emisi NO_x yang dibuat manusia berasal dari pembakaran arang, minyak, gas alam, dan bensin.

Pembentukan NO dan NO₂ mencakup reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO, kemudian reaksi selanjutnya antara NO dengan lebih banyak oksigen membentuk NO₂. Adapun persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Reaksi pembentukan NO₂ dari NO dan O₂ terjadi dalam jumlah relative kecil, meskipun dengan adanya udara berlebih. Kecepatan reaksi ini dipengaruhi oleh suhu dan konsentrasi NO. pada suhu yang lebih tinggi, kecepatan reaksi pembentukan NO₂ akan berjalan lebih lambat. Selain itu, kecepatan reaksi pembentukan NO₂ juga dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen dan kuadrat dari konsentrasi NO. Dengan demikian, jika konsentrasi NO bertambah menjadi dua kali, maka kecepatan reaksi akan naik empat kali. Tetapi jika konsentrasi NO kurang setengah maka kecepatan reaksi akan turun menjadi seperempat (Fardiaz, 1992).

Gas NO dan NO₂ dapat bertahan di udara selama 5 hari, sedangkan N₂O dapat bertahan relative lebih lama, yaitu antara 4 sampai 8 tahun. Gas NO dapat teroksidasi menjadi NO₂, kemudian dapat bereaksi dengan air hujan atau uap air membentuk asam nitrat. Gas N₂O bergerak ke atas dan dapat mencapai lapisan stratosfer, serta mengalami oksidasi menjadi NO. Gas NO berperan besar dalam menjaga kestabilan jumlah ozon di stratosfer. Oksigen nitrogen dapat mengalami pengurangan jumlah di udara sebagai akibat larut dalam air

hujan, kontak dengan tanah, bangunan, dan batuan, terserap oleh air dan tanaman (Prodjosantoso & Taufik, 2011).

Udara terdiri dari sekitar 80% volume nitrogen dan 20% volume oksigen. Pada suhu kamar, kedua gas tersebut hanya sedikit mempunyai kecenderungan untuk bereaksi satu sama lain. Pada suhu yang lebih tinggi ($> 1210\text{ }^{\circ}\text{C}$) keduanya dapat bereaksi membentuk nitrit oksida dalam jumlah tinggi sehingga mengakibatkan polusi udara. Dalam proses pembakaran, suhu yang digunakan biasanya mencapai $1210 - 1765\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan adanya udara. Oleh karena itu reaksi tersebut merupakan sumber NO yang penting. Jadi reaksi pembentukan NO merupakan reaksi hasil samping dalam proses pembakaran (Prabowo & Muslim, 2018).

Penyebaran dan konsentrasi berbagai jenis NO_x di lingkungan perkotaan pada prinsipnya dipengaruhi oleh:

1. Topografi lokal, khususnya adanya canyon gedung-gedung tinggi, yang dapat meningkatkan kadar NO_2 secara lokal, khususnya pada sisi jalan.
2. Keadaan meteorologi, misalnya inversi suhu yang terjadi di atas kota dapat mengurangi *mixing height* sehingga akan meningkatkan kadar NO_2 .

Sebagian NO di atmosfer akan diubah menjadi NO_2 melalui proses-proses lain yang tidak merupakan reaksi langsung kadar O_2 . Proses ini disebut daur fotolitik NO_2 yang merupakan akibat langsung dari interaksinya terhadap cahaya matahari. Secara ringkas tahap-tahap reaksi tersebut dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Gas NO_2 menyerap energy sinar matahari dari komponen gelombang pendek yaitu sinar ultraviolet
2. Energy yang diserap tersebut memecah molekul-molekul NO_2 dan atom-atom oksigen yang bersifat sangat reaktif
3. Atom-atom oksigen tersebut akan bereaksi dengan oksigen bebas di udara (O_2), membentuk ozon (O_3) yang merupakan polutan udara sekunder
4. Ozon akan bereaksi dengan NO membentuk NO_2 dan O_2 sehingga reaksi menjadi lengkap berlangsung secara terus menerus dan teratur.

Daur tersebut tidak berpengaruh apapun jika tidak terdapat reaktan lain, sehingga konsentrasi NO dan NO_2 tidak berubah karena ozon dan NO yang terbentuk akan hilang dengan jumlah yang setimbang. Gas NO akan sangat cepat diubah menjadi NO_2 dibandingkan kecepatan disosiasi NO_2 menjadi NO dan O , sehingga menyebabkan ozon terakumulasi di atmosfer. Oleh karena itu, gas-gas NO_x (khususnya NO_2) dianggap sebagai polutan udara bagi unsur/senyawa oksida lain (Fardiaz, 1992).

Gas nitrogen dioksida jika mencemari udara mudah diamati dari bau yang sangat menyengat dan berwarna coklat kemerahan. Sifat racun (toksisitas) gas NO_2 empat kali lebih kuat dari pada toksisitas NO . Organ tubuh yang paling peka terhadap polutan gas NO_2 adalah paru-paru. Paru-paru yang terkontaminasi oleh gas NO_2 akan membengkak sehingga penderita sulit bernafas yang dapat mengakibatkan kematian. Konsentrasi gas NO yang tinggi dapat menyebabkan gangguan pada sistem saraf yang mengakibatkan kejang-kejang bila

berlanjut dapat menyebabkan kelumpuhan, juga dapat menyebabkan iritasi pada mata, serta timbulnya *peroxy acetil nitrates* (PAN) (Prabowo & Muslim, 2018).

6.4.4 Sulfur Oksida (SO_x)

Sulfur oksida terutama disebabkan oleh dua jenis gas belerang yang tidak berwarna yaitu gas SO_2 yang berbau sangat tajam dan tidak dapat terbakar di udara dengan SO_3 yang tidak reaktif. Kedua jenis gas tersebut merupakan sumber polutan yang melibatkan kegiatan manusia, yaitu dari proses pembakaran bahan bakar yang mengandung belerang, termasuk bahan bakar minyak yang ditambang dari daerah vulkanik dan batubara. Gas ini dapat bereaksi dengan oksigen, amoniak, dan senyawa lainnya, seperti uap air membentuk embun dan larutan asam sulfat serta senyawa sulfat lainnya (Prodjosantoso & Taufik, 2011). Asam sulfat bersifat sangat reaktif, mudah bereaksi dengan benda-benda lain yang mengakibatkan kerusakan, seperti proses korosi dan proses kimiawi lainnya. Konsentrasi gas SO_2 di udara akan mulai terdeteksi oleh penciuman indra manusia dengan konsentrasi sekitar 0.3 – 1 ppm (Prabowo & Muslim, 2018).

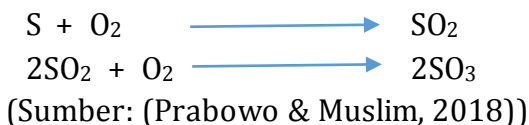
Ada dua factor yang terlibat dalam reaksi pembentukan SO_2 yang menyebabkan jumlahnya sedikit, yaitu:

1. Kecepatan reaksi yang terjadi berlangsung sangat lambat pada suhu yang relative rendah ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) tetapi meningkat sejalan dengan peningkatan suhu. Sebaliknya reaksi setimbang akan lebih tinggi apabila berlangsung pada suhu rendah akan lebih banyak menghasilkan SO_2 , dibandingkan pada suhu tinggi.

2. Konsentrasi SO_3 dalam campuran setimbang akan lebih tinggi apabila reaksi setimbang pada suhu rendah dibandingkan dengan konsentrasi SO_3 dalam reaksi setimbang pada suhu yang tinggi.

Jumlah belerang yang terdapat di atmosfer sebanyak sepertiga dari jumlah yang dimiliki yang merupakan hasil dari aktivitas manusia, dan kebanyakan dalam bentuk SO_2 . Sebanyak dua pertiga dari jumlah belerang di atmosfer berasal dari sumber-sumber alam seperti volcano, dan terdapat dalam bentuk H_2S dan oksida. Masalah yang ditimbulkan oleh polutan yang dibuat manusia adalah dalam hal distribusi yang tidak merata sehingga terkonsentrasi pada daerah tertentu, bukan dari jumlah keseluruhannya, sedangkan polusi dari sumber alami biasanya lebih tersebar merata.

Pembakaran bahan-bahan yang mengandung belerang akan menghasilkan kedua bentuk sulfur dioksida, tetapi jumlah relative masing-masing tidak dipengaruhi oleh jumlah oksigen yang tersedia. Meskipun udara tersedia dalam jumlah cukup, SO_2 selalu terbentuk dalam jumlah besar. Jumlah SO_2 yang terbentuk dipengaruhi oleh kondisi reaksi, terutama suhu dan bervariasi dari 1 sampai 10% dari total SO_x . Mekanisme pembentukan SO_x dapat dituliskan dalam dua tahap reaksi sebagai berikut:



Adanya SO_3 di udara dalam bentuk gas hanya mungkin jika konsentrasi uap air sangat rendah. Jika uap air terdapat dalam jumlah cukup seperti biasanya, maka SO_3 dan air akan segera bergabung membentuk droplet asam sulfat. Setelah berada di atmosfer, sebagian SO_2 akan diubah menjadi SO_3 (kemudian menjadi asam sulfat) oleh proses-proses fotolitik dan katalitik. Jumlah SO_2 yang teroksidasi menjadi SO_3 dipengaruhi oleh beberapa factor termasuk jumlah air yang tersedia, intensitas, waktu, dan distribusi spectrum sinar matahari (Prabowo & Muslim, 2018).

Konsekuensi lebih lanjut dari senyawa-senyawa belerang di udara (SO_x dan H_2SO_4) antara lain berupa:

1. Di atas kawasan yang tercemar oleh senyawa-senyawa belerang akan terbentuk hujan asam yang lebih asam
2. Keberadaan senyawa-senyawa belerang baik berupa hujan asam ataupun bukan, tetap akan menyebabkan proses korosi pada logam dan atau proses pemburaman permukaan bangunan yang mengandung kapur/marmer
3. Karena sifat afinitas belerang terhadap logam-logam berat relative lebih tinggi, maka campuran polutan belerang dengan polutan logam berat (Pb) akan membentuk logam sulfida (PbS). Oleh karena itu polutan logam berat mudah mengendap dan terintersepsi oleh berbagai jenis permukaan.

Oksida belerang dapat menyebabkan iritasi pada mata, tenggorokan, dan saluran pernafasan lainnya. Kondisi pasien asma, bronchitis dan emfisema dapat menjadi semakin parah dengan adanya oksida belerang. Dalam bentuk gas, SO_2 dapat

menyebabkan iritasi pada paru-paru dan menyebabkan timbulnya kesulitan bernafas, terutama pada kelompok orang sensitive seperti orang berpenyakit asma, anak-anak dan lansia (Irianti, *et al.*, 2017).

6.4.5 Oksidan Fotokimia

Oksidan fotokimia merupakan komponen atmosfer yang diperoleh oleh proses fitokimia, yaitu suatu proses kimia yang membutuhkan sinar, yang akan mengoksidasi komponen yang tidak segera dapat dioksidasi oleh gas oksigen. Senyawa yang terbentuk merupakan polutan sekunder yang diproduksi karena interaksi antara polutan primer dengan sinar matahari. Hidrokarbon merupakan komponen yang berperan dalam produksi oksidan fotokimia. Polutan sekunder yang dihasilkan oleh reaksi hidrokarbon dalam siklus fotolitik NO_2 adalah ozon (O_3) dan peroksi asetil nitrat (PAN) yang sangat berbahaya.

Jenis-jenis oksidan fotokimia seperti ozon, nitrogen dioksida, dan peroksi asetil nitrat merupakan oksidan utama yang dapat dihasilkan dari proses fotokimia. Nitrogen dioksida berasal dari reaksi fotokimia NO dan oksigen di udara, sedangkan ozon dan PAN berasal dari reaksi fotokimia NO, NO_2 , SO_2 , dan radikal hidrokarbon. Ozon bukan merupakan hidrokarbon tetapi konsentrasi O_3 di atmosfer naik sebagai akibat langsung dari reaksi hidrokarbon, sedangkan PAN merupakan turunan hidrokarbon. Hasil reaksi antara oksigen dengan hidrokarbon merupakan produk intermediate yang sangat reaktif disebut hidrokarbon radikal bebas (RO_2). Radikal bebas ini dapat bereaksi lebih lanjut dengan berbagai

komponen termasuk NO, NO₂, O₂, O₃, dan hidrokarbon lainnya (Prabowo & Muslim, 2018).

Beberapa reaksi yang mungkin terjadi dari radikal bebas hidrokarbon sebagai berikut:

1. Radikal bebas bereaksi cepat dengan NO membentuk NO₂, karena NO dihilangkan dari siklus, sehingga mekanisme normal untuk menghilangkan O₂ dari siklus tidak terjadi, yang dapat menyebabkan konsentrasi O₃ meningkat.
2. Radikal bebas dapat bereaksi dengan O₂ dan NO₂ membentuk peroksi asetil nitrat (PAN)
3. Radikal bebas dapat bereaksi dengan hidrokarbon lainnya dan komponen oksigen membentuk komponen-komponen organik lainnya yang tidak diinginkan (Fardiaz, 1992).

Campuran produk-produk sebagai akibat gangguan hidrokarbon dalam siklus fotolitik NO₂ disebut smog fotokimia, yaitu terdiri dari kumpulan O₃, CO, PAN, dan komponen-komponen organik lainnya termasuk aldehid, keton, dan alkil nitrat. Konsentrasi oksida di udara dipengaruhi oleh ada tidaknya sinar matahari dan kadar bahan-bahan polutan primer di udara (Prabowo & Muslim, 2018).

DAFTAR PUSTAKA

- (BPOM), B. P. O. d. M., 2015. *Artikel BPOM: Keracunan Karbon Monoksida*. Jakarta: Sistem Informasi Keracunan Nasional.
- Fardiaz, S., 1992. *Polusi Air dan Udara*. Jakarta : Penerbit Kanisius.
- Irianti, T. T., Sugiyanto, Kuswandi, M. & Nuranto, S., 2017. *Toksikologi Lingkungan*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Irianto, K., 2015. *Buku Bahan Ajar: Pencemaran Lingkungan*. Denpasar: Fakultas Pertanian Program Studi Agroteknologi, Universitas Warmadeva.
- Kurniawidjaja, L. M., Lestari, F., Tejamaya, M. & Ramadhan, D. H., 2021. *Konsep Dasar Toksikologi Industri*. Depok: fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia.
- Prabowo, K. & Muslim, B., 2018. *Buku Ajar Kesehatan Lingkungan: Penyehatan Udara*. Cetakan Pertama ed. Jakarta: PPSDMK BPPSDMK Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Prodjosantoso, A. K. & Taufik, R., 2011. *Kimia Lingkungan (Teori, Eksperimen, dan Aplikasi)*. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- Sastrawijaya, A. T., 2000. *Pencemaran Lingkungan*. Edisi Revisi ed. Jakarta: Rineka Cipta.
- Vallero, D. A., 2014. *Fundamentals of Air Pollution*. Berillustrasi ed. s.l.:Elsevier Science and Technology Books.
- Wardhana, W. A., 2004. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: ANDI Offset.

- Wardoyo, A. Y. P., 2016. *Emisi Partikulat Kendaraan Bermotor dan Dampak Kesehatan*. Cetakan Pertama ed. Malang: University Brawijaya Press (UB Press).
- Yulianto & Amaloyah, N., 2017. *Buku Ajar Kesehatan Lingkungan: Toksikologi Lingkungan*. Cetakan Pertama ed. Jakarta: PPSDMK BPPSDMK Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.

BAB 7

KUALITAS UDARA AMBIEN

Oleh Darsini

7.1 Pengantar

Udara dibagi menjadi udara emisi dan udara ambien. Udara emisi adalah udara yang dikeluarkan oleh sumber emisi seperti gas buang. Sedangkan udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi yang dihirup oleh makhluk hidup sehari-hari (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999). Untuk mendapatkan kualitas udara ambien yang baik, maka diperlukan pengendalian pencemaran. Pengukuran kualitas udara ambien dilakukan di kawasan pemukiman, kawasan industri, kawasan lalu lintas yang tidak ada aktivitas dan terdapat aktivitas manusia. Parameter yang dipantau untuk udara ambien adalah Nitrogen dioksida (NO_2); sulfur dioksida (SO_2); Oksidan (Ox); Hidrogen Sulfida (H_2S); karbon monoksida (CO); Ammonia (NH_3); Timbal (Pb); Hidrokarbon (HC); debu, suhu, kecepatan arah angin.

Udara merupakan komponen penting untuk kelangsungan hidup, terutama manusia. Pengertian udara adalah campuran gas-gas yang terkandung dalam lapisan-lapisan yang mengelilingi bumi. Udara terdiri dari 78% nitrogen; 21,4% oksigen; 0,93% argon; 0,032% karbon dioksida; dan gas mulia lainnya di atmosfer (Ibrahim dkk., 2022). Udara merupakan salah satu komponen lingkungan

hidup yang merupakan kebutuhan pokok bagi manusia dan seluruh makhluk hidup yang ada di bumi. Udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi di troposfer yang berada dalam wilayah hukum Negara Kesatuan Republik Indonesia yang diperlukan untuk mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan hidup lainnya. Namun saat ini pencemaran udara terutama di kota-kota besar di Indonesia sudah mencapai tingkat yang sangat memprihatinkan. Sumber pencemaran udara juga dapat disebabkan oleh berbagai aktivitas alam, seperti kebakaran hutan, letusan gunung berapi, gas alam beracun, dan sebagainya. Dampak pencemaran udara dapat mengakibatkan penurunan kualitas udara yang pada akhirnya berdampak negatif bagi kesehatan manusia. (Prabowo, K; Muslim, 2018)

Menurut Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup No. KEP-03/MENKLH/II/1991 yang dimaksud dengan pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam udara oleh kegiatan manusia atau proses alam, sehingga kualitas udara turun sampai tingkat tertentu yang mengakibatkan udara menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. Sedangkan berdasarkan Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, yang dimaksud dengan pencemaran udara adalah “masuknya atau dimasukkannya zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga mutu udara ambien turun sampai tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat menjalankan fungsinya.” ”.

7.2 Standar Kualitas Udara Ambien

Kualitas udara merupakan cerminan dari konsentrasi parameter kualitas udara di udara. Semakin besar konsentrasi parameter kualitas udara, semakin buruk kualitas udaranya. Semakin kecil konsentrasi parameter udara, semakin baik kualitas udaranya. Kualitas udara dibagi menjadi dua, yaitu kualitas udara emisi dan kualitas udara ambien. Kualitas udara ambien adalah kualitas udara yang diukur di udara terbuka (pemukiman). Kualitas udara ambien adalah langkah pertama dalam memahami dampak negatif polusi terhadap lingkungan. (Abidin, 2010)

Standar kuantitatif mengenai baku mutu pencemaran udara diatur oleh baku mutu udara ambien dan baku mutu emisi. Udara di sekitar baku mutu mengatur kadar yang diperoleh zat atau pencemar yang ada di udara tetapi tidak menimbulkan gangguan terhadap makhluk hidup, tumbuhan dan atau benda mati (Mulia, 2005). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999 bahwa baku mutu udara ambien adalah ukuran batas atau ukuran zat, energi, dan/atau komponen yang ada atau seharusnya ada dan/atau unsur pencemar yang keberadaannya ditoleransi di udara sekitarnya. Udara yang melebihi baku mutu dapat merusak lingkungan sekitar dan berpotensi mengganggu kesehatan masyarakat sekitar. Baku mutu ambien nasional yang digunakan berdasarkan (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.1 di bawah ini:

Tabel 7.1 Standar Kualitas Udara Ambien Nasional

No	Parameter	Waktu Pengukuran	Standar Mutu (Nasional)	Metode Analisis	Peralatan
1	SO ₂ (Sulfur dioksida)	1 jam	900 µg/ Nm ³	Pararosanilin	Spektrofotometer
		24 jam	µg /Nm ³		
		1 tahun	60 µg/Nm ³		
2	BERSAMA (Karbon monoksida)	1 jam	30.000 µg/ Nm ³	NDIR	Penganalisa NDIR
		24 jam	10.000 µg/ Nm ³		
		1 tahun			
3	No ₂ (Nitrogen dioksida)	1 jam	µg /Nm ³	Saltzman	Spektrofotometer
		24 jam	150 µg/Nm ³		
		1 tahun	100 µg/Nm ³		
4	HC (Hidro Karbon)	3 jam	µg /Nm ³	Flamed Ionisasi	Kromatografi Gas
5	PM ₁₀ (Partikel<10)	24 jam	150 µg/Nm ³	Gravimetri	Hi-Vol
6	PM _{2,5}	24 jam	65 µg/ Nm ³	Gravimetri	Hi-Vol
7	PM _{2,5} (Partikel<2.5)	1 tahun	15 µg /Nm ³	Gravimetri	Hi-Vol
8	TSP (Debu)	24 jam	µg /Nm ³	Gravimetri	Hi-Vol
		1 tahun	90 µg/ Nm ³		

Sumber : PP RI No. 41 Tahun 1999

Pencemaran udara ambien dirasakan semakin hari semakin meningkat, terutama di kawasan pemukiman, kawasan industri, dan kawasan padat lalu lintas, dimana banyak aktivitas dan aktivitas manusia yang paling besar. Pencemaran udara ambien juga dapat berdampak pada lingkungan alam, antara lain: hujan asam, penipisan ozon, dan pemanasan global.

7.3 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kualitas Udara Udara

Polutan adalah zat yang berada di atmosfer dalam konsentrasi tertentu yang berbahaya bagi manusia, hewan, tumbuhan atau benda lainnya. Zat yang tergolong pencemar udara di lokasi tertentu dan berdampak pada kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya antara lain partikel (PM₁₀) dan (PM_{2.5}), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), belerang dioksida (SO₂), ozon (O₃), hidrokarbon (HC), dan oksidan fotokimia. (Triani, 2007)

Indeks Standar Pencemar Udara yang selanjutnya disingkat ISPU adalah angka atau angka yang tidak memiliki satuan yang berbeda yang menggambarkan kondisi kualitas udara ambien di suatu lokasi tertentu, yang didasarkan pada dampaknya terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan lain-lain. makhluk hidup. ISPU sebagaimana dimaksud meliputi parameter sebagai berikut: (PP RI Nomor 14 Tahun 2020)

7.3.1 Partikulat

Partikulat atau partikel (PM) adalah partikel halus, baik padat maupun cair yang tersuspensi dalam gas. Partikel adalah polutan udara yang dapat hidup berdampingan dengan bahan atau bentuk polutan lainnya. Partikel dapat diartikan secara murni atau sempit sebagai pencemar udara dalam bentuk padat. Namun dalam arti luas, dalam kaitannya dengan masalah pencemaran lingkungan, partikel pencemar dapat mencakup berbagai bentuk, mulai dari bentuk yang sederhana hingga yang kompleks, yang kesemuanya merupakan bentuk pencemaran udara. Kategori partikulat terdiri dari partikel padat atau tetesan

cairan (aerosol) yang cukup kecil untuk tetap tersuspensi di udara. Partikel semacam itu tidak memiliki komposisi kimia umum dan sebenarnya sangat kompleks. Contohnya termasuk jelaga, asap, debu, serat asbes, dan pestisida, serta beberapa logam (termasuk Hg, Fe, Cu, dan Pb). Partikel berdiameter 10 μ m atau lebih besar umumnya tetap berada di luar atmosfer dalam waktu kurang dari sehari, sedangkan partikel berdiameter 1 μ m atau kurang dapat tetap tersuspensi di udara selama berminggu-minggu. Pencemaran partikel dapat bersumber dari kejadian alam dan dapat juga dari kegiatan manusia. Pencemaran partikel yang bersumber dari alam, adalah sebagai berikut:

- a. Debu/pasir halus yang tertiuap angin kencang.
- b. Abu dan material vulkanik terlempar ke udara akibat letusan gunung berapi.
- c. Uap panas menyembur di sekitar area sumber panas bumi di pegunungan.

Pencemaran partikel yang bersumber akibat dari kegiatan manusia sebagian besar berasal dari pembakaran batu bara, proses industri, kebakaran hutan dan gas buang dari alat transportasi. Debu adalah zat padat yang dihasilkan oleh manusia atau alam dan merupakan hasil dari proses penguraian suatu bahan. Debu yang dihasilkan merupakan zat padat berukuran 0,1 – 25 mikron. Debu termasuk dalam kelompok partikulat. Partikulat merupakan zat halus/cair yang tersuspensi di udara, misalnya embun, debu, asap, asap, dan kabut. Partikel tersebar di atmosfer akibat berbagai proses alam, seperti letusan gunung berapi,

hembusan debu dan tanah oleh angin. Aktivitas manusia juga berperan dalam penyebaran partikel, misalnya berupa debu dan partikel asbes dari bahan bangunan, fly ash dari proses peleburan baja dan asap dari proses pembakaran tidak sempurna terutama dari batu bara. Sumber utama partikel adalah pembakaran bahan bakar dari sumbernya, diikuti oleh proses industri.

Partikel debu dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu debu organik, debu mineral, dan debu logam. Debu bersumber dari berbeda-beda, tergantung jenis debu tersebut. Partikel debu sangat dipengaruhi oleh gravitasi bumi sehingga cenderung mengendap di permukaan bumi. Partikel debu juga dapat membentuk “flocks” sehingga permukaan yang semakin besar cenderung basah. Sifat tersebut membuat ukurannya menjadi lebih besar sehingga memudahkan proses pengendapan di permukaan bumi dengan bantuan gravitasi. Partikel debu dengan diameter 1 milimikron memiliki kemampuan menghamburkan sinar matahari.

7.3.2 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah gas yang tidak berwarna dan tidak berbau, tetapi sangat beracun. Karbon monoksida (CO) merupakan polutan utama di udara perkotaan akibat pembakaran bahan bakar fosil yang tidak sempurna. Area paparan tertinggi berada di sepanjang jalan raya dan jalan dengan lalu lintas intensitas tinggi. Karbon monoksida yang ditemukan di alam terbentuk dari salah satu proses berikut:

- Pembakaran tidak sempurna dari karbon atau komponen yang mengandung karbon.
- Reaksi antara karbon dioksida dan komponen yang mengandung karbon pada suhu tinggi.
- Pada suhu tinggi, karbon dioksida terurai menjadi CO dan O

Gas CO besar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dengan udara, berupa gas buang. Kota-kota besar dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi menghasilkan gas CO yang banyak sehingga kadar CO di udara relatif lebih tinggi dibandingkan dengan pedesaan. Secara alami gas CO juga dapat terbentuk walaupun jumlahnya relatif kecil, seperti gas dari aktivitas vulkanik, proses biologis dan sebagainya.

7.3.3 Nitrogen oksida

Nitrogen oksida (NO_x), khususnya nitrogen dioksida (NO₂) yang dihasilkan dari pembakaran pada suhu tinggi, juga terjadi secara alami selama badai petir. Nitrogen oksida berkontribusi terhadap hujan asam karena bergabung dengan air untuk menghasilkan asam nitrat (HNO₃) dan asam lainnya. Nitrogen oksida sering disebut No_x, karena nitrogen oksida memiliki 2 bentuk yang berbeda, yaitu terbentuk dari gas NO₂ dan gas NO. Sifat gas NO₂ adalah warna dan bau, sedangkan gas NO tidak berwarna dan tidak berbau. Warna gas NO₂ adalah bau yang menyengat, menyengat dan berwarna merah kecoklatan. Seperti CO, emisi nitrogen oksida dipengaruhi oleh kepadatan penduduk karena sumber utama No_x adalah aktivitas

manusia dari pembakaran, dan sebagian dari pembakaran ini disebabkan oleh kendaraan bermotor, produksi 115system, dan pembuangan limbah. Sebagian besar emisi Nox buatan manusia dihasilkan dari pembakaran arang, minyak, gas alam, dan bensin. Gas nitrogen dioksida (NO_2) yang mencemari udara mudah diamati dari baunya yang sangat menyengat dan berwarna coklat kemerahan. Organ yang paling 115system115ve terhadap polusi gas NO_2 adalah paru-paru. Penderitanya mengalami kesulitan dalam bernafas, karena paru-paru yang terkontaminasi gas NO_2 akan membengkak sehingga dapat menyebabkan kematian. Konsentrasi gas NO yang tinggi dapat menyebabkan gangguan pada 115system saraf yang mengakibatkan kejang. Pada tanaman dapat menyebabkan nekrosis atau kerusakan jaringan daun. Pencemaran udara oleh gas Nox juga dapat menyebabkan Peroxy Acetil Nitrates (PAN). PAN dapat mengakibatkan iritasi pada mata yang menyebabkan mata terasa perih dan berair.

7.3.4 Sulfur dioksida

Sulfur dioksida adalah penyebab hujan asam, yang dihasilkan ketika SO_2 bergabung dengan tetesan air untuk membentuk asam sulfat (H_2SO_4). Belerang dioksida dan aerosol troposfer lainnya yang mengandung belerang diyakini mempengaruhi keseimbangan radiasi atmosfer, yang dapat menyebabkan pendinginan di area tertentu. Gas belerang oksida (Sox), terdiri dari gas SO_2 dan gas SO_3 , keduanya memiliki sifat yang berbeda. Gas SO_2 berbau sangat tajam dan tidak mudah terbakar, sedangkan gas SO_3 sangat reaktif. Gas

SO₃ mudah bereaksi dengan uap air di udara membentuk asam sulfat (H₂SO₄). Asam sulfat sangat reaktif dan mudah bereaksi dengan zat lain sehingga menyebabkan kerusakan pada proses pengelasan (korosi) dan proses kimia lainnya. Konsentrasi gas SO₂ di udara dapat dideteksi oleh penciuman manusia bila konsentrasinya antara 0,3 – 1 ppm. Hanya sepertiga dari jumlah belerang di atmosfer yang merupakan hasil aktivitas manusia, dan sebagian besar dalam bentuk SO₂. Sebanyak dua pertiga jumlah belerang di atmosfer berasal dari sumber alami seperti gunung berapi, dan hadir dalam bentuk H₂S dan oksida. Masalah yang ditimbulkan oleh pencemar buatan manusia adalah pendistribusiannya tidak merata sehingga terkonsentrasi pada daerah tertentu, tidak dalam jumlah total, sedangkan pencemar dari sumber alam biasanya lebih merata. Transportasi bukanlah sumber utama pencemar SO_x, tetapi pembakaran bahan bakar pada sumbernya merupakan sumber utama pencemar SO_x, misalnya pembakaran batu bara, bahan bakar minyak, gas, kayu dan sebagainya.

7.3.5 Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon (HCs), atau senyawa organik yang mudah menguap (VOC), adalah senyawa hidrogen dan karbon. Metana (CH₄), hidrokarbon paling melimpah di atmosfer, adalah gas rumah kaca aktif. Bahan organik yang mudah menguap termasuk *hidrokarbon non-metana* (NMHCs), seperti benzena, dan turunannya, atau juga formaldehida. Beberapa HCs yang relatif reaktif berkontribusi terhadap produksi ozon dalam asap fotokimia.

7.3.6 Oksidan Fotokimia

Oksidan fotokimia merupakan komponen atmosfer yang dihasilkan oleh proses fotokimia, proses kimiawi yang membutuhkan cahaya untuk mengoksidasi komponen yang tidak mudah teroksidasi oleh gas oksigen. Senyawa-senyawa yang terbentuk merupakan polutan sekunder yang dihasilkan dari interaksi antara polutan primer dengan sinar matahari. Hidrokarbon adalah komponen yang berperan dalam produksi oksidan fotokimia. Reaksi ini tentunya melibatkan siklus fotolitik NO₂. Polutan sekunder paling berbahaya yang dihasilkan oleh reaksi hidrokarbon dalam siklus tersebut adalah ozon (O₃) dan peroksiasetil nitrat, yang merupakan salah satu komponen paling sederhana dari kelompok peroksiasiln nitrat (PAN). (Prabowo, K; Muslim, 2018)

1. zat radioaktif

Zat radioaktif terdiri dari radon-222; yodium-131; strontium-90; plutonium-239; dan radioisotop lainnya yang masuk atmosfer bumi dalam bentuk gas atau partikel tersuspensi.

2. Panas

Energi panas yang dilepaskan selama proses perubahan bentuk, saat pembakaran minyak menjadi gas pada kendaraan, pabrik, perumahan, dan pembangkit listrik merupakan bagian utamanya.

3. Suara

Suara yang dianggap mengganggu aktivitas kehidupan manusia biasanya ditimbulkan oleh alat transportasi seperti kendaraan bermotor, pesawat terbang, kereta api ,

mesin industri, konstruksi, mesin pemotong rumput, sirene dan lain sebagainya.

7.4 Ambang Batas Kualitas Udara

Nilai batas polutan yang direkomendasikan WHO didasarkan pada pola harian, tahunan, atau periode waktu yang menunjukkan satuan berat dalam mikrogram (μg) per satuan volume meter kubik (m^3). Indonesia menggunakan sistem pelaporan indeks pencemaran udara standar (ISPU). Berikut Nilai Ambang Parameter Pencemar Udara (Kementerian Lingkungan Hidup, 1997)

Tabel 7.2. Batas ambang untuk parameter polutan udara

Nama Polutan	Konten ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
	Harian	Tahunan	1 jam	8 jam	10 menit
PM10	50	20	-	-	-
PM2.5	25	10	-	-	-
Ozon	-	-	-	100	-
oksida nitrat	-	40	200	-	-
Sulfur dioksida	20	-	-	-	500

Berdasarkan Indeks Kualitas Udara dalam hal ini : Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) yang resmi digunakan di Indonesia adalah Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), hal ini sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor : KEP 45/MENLH/1997 tentang Indeks Standar Pencemar Udara. Keputusan Menteri yang dijadikan bahan pertimbangan antara lain: bahwa sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan upaya pengendalian pencemaran udara, perlu disusun Indeks Standar Pencemar Udara yang diberikan

kemudahan keseragaman informasi kualitas udara ambien kepada masyarakat pada suatu lokasi dan waktu tertentu. Seperti pada tabel berikut, kisaran Indeks Standar Pencemar Udara.

Tabel 7.3. Kisaran Indeks Standar Polutan Udara

No	Kategori	Jangkauan	Penjelasan
1	Sehat	0-50	Untuk kesehatan manusia atau hewan serta tanaman, bangunan atau nilai estetika, tingkat Kualitas Udara tidak berpengaruh
2	Saat ini	51-100	Pada kesehatan manusia atau hewan, tingkat kualitas udara tidak berpengaruh tetapi mempengaruhi tumbuhan yang sensitif dan nilai estetika
3	Tidak sehat	101-199	Bagi manusia atau hewan yang sensitif tingkat kualitasnya berbahaya atau dapat menyebabkan kerusakan tanaman atau nilai estetika.
4	Sangat Tidak Sehat	200-299	Di beberapa segmen populasi yang terpapar, tingkat kualitas udara dapat merugikan kesehatan
5	Berbahaya	300-Lebih	Secara umum, tingkat kualitas udara yang berbahaya dapat menyebabkan bahaya serius bagi kesehatan.

7.5 Penyebab dan Upaya Mencegah Pencemaran Udara

Pencemaran udara penyebab utama yang terbesar berasal dari kegiatan manusia, belum lagi kebakaran hutan sebagai salah satu penyebab pencemaran terbesar yang meliputi pencemaran udara yang disebabkan oleh manusia.

Secara alami Penyebab pencemaran udara ambien tidak terhitung jumlahnya, hampir semuanya terjadi karena aktivitas dan aktivitas manusia (antropogenik). Berikut adalah penyebab utama pencemaran udara :

1. Pencemaran yang disebabkan oleh kendaraan bermotor (termasuk mobil, cerobong asap, dan input industri lainnya);
2. Pembangkit listrik ;
3. Pencemaran akibat letusan gunung berapi;
4. Pencemaran akibat limbah asap industri pabrik;
5. Pencemaran akibat Limbah pertanian;
6. Pencemaran udara akibat kegiatan pertambangan;
7. Pencemaran akibat kegiatan rumah tangga;
8. Kebakaran hutan adalah polusi udara; Pengaruh tempat pembuangan sampah terhadap polusi udara;
9. Pembalakan liar atau pembalakan liar

Emisi dari sumber antropogenik dan alami dalam jangka waktu yang lama akan meningkatkan konsentrasi serta sifat kimia dan fisik polutan. Sumber partikulat dapat terjadi secara alami atau buatan manusia. Secara alami berasal dari badai debu, gunung berapi dan kebakaran hutan. Buatan manusia meliputi pembangun tenaga dan proses industri.

Dalam upaya pencegahan pencemaran udara yang dapat dilakukan antara lain :

1. Mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, terutama yang mengandung asap dan gas pencemar lainnya agar tidak mencemari lingkungan

2. Gunakan filter asap sebelum melepaskannya ke udara dengan memasang penyerap atau filter polutan;
3. Buang gas buang ke dalam air atau larutan penguat sebelum dilepaskan ke udara, atau dengan menurunkan suhu sebelum gas dibuang ke atmosfer;
4. Membangun cerobong asap yang cukup tinggi agar asap dapat menembus lapisan inversi termal agar tidak menambah polutan yang terperangkap di atas pemukiman;
5. Perbanyak penghijauan di daerah yang polusi udaranya tinggi, karena selain sebagai alat penahan debu juga sebagai penahan partikel lain.

Pencemaran tidak hanya berbahaya saat ini, tetapi juga berbahaya bagi kelangsungan hidup manusia dan makhluk lainnya di masa mendatang. Oleh karena itu, kita sebagai manusia harus aktif mengkampanyekan kepedulian terhadap alam. Dengan menjaga alam secara keseluruhan, tidak hanya udara, tetapi juga air dan tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z. 2010. *Beberapa istilah yang digunakan dalam pengendalian pencemaran udara 1. Urindo.*
- Ibrahim, Z., Boekoesoee, L., & Lalu, NAS. 2022. *Identifikasi Kualitas Udara Ambien Di Sekitar Kota Gorontalo. Tinjauan Kesehatan Masyarakat dan Pengawasan, 1 (1),*
<https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/jje>
- Menteri Negara Lingkungan Hidup. 1997. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 45 Tahun 1997 tentang : Indeks Standar Pencemar Udara .*
- Mulia, R. 2005. *Kesehatan lingkungan. Graha Sains, Yogyakarta .*
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 T. 1999. *PP RI Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Peraturan Pemerintah .*
<https://doi.org/10.24952/el-thawalib.v3i2.5331>
- PP RI Nomor 14. 2020. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemaran Udara .*
- Prabowo, K; Muslim, B. (2018). *Modul Bahan Ajar Kesehatan Lingkungan (Print 1).* BPSDMK Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Triani. 2007. *Polusi Udara . Buletin Sampah*
- Zahra, NL, Haidar, FA, Hanum, Y., Ramadhanti, D., Ramadhan, R., Rahman, A., Qonitan, FD, & Ridhosari, B. 2022. *Pemantauan Kualitas Udara Ambien di Kompleks Universitas Pertamina pada Masa Pandemi COVID-19. Jurnal Teknologi Lingkungan , (1),*
<https://doi.org/10.29122/jtl.v23i1.4597>

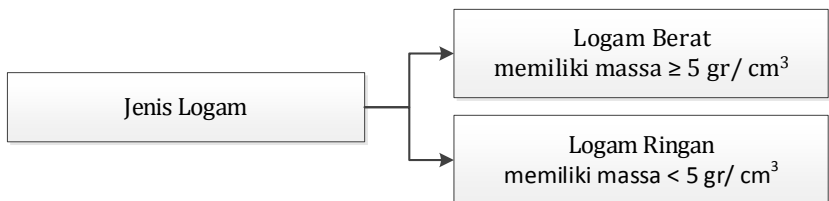
BAB 8

TOKSIKOLOGI LOGAM BERAT

Oleh Dodi Satriawan

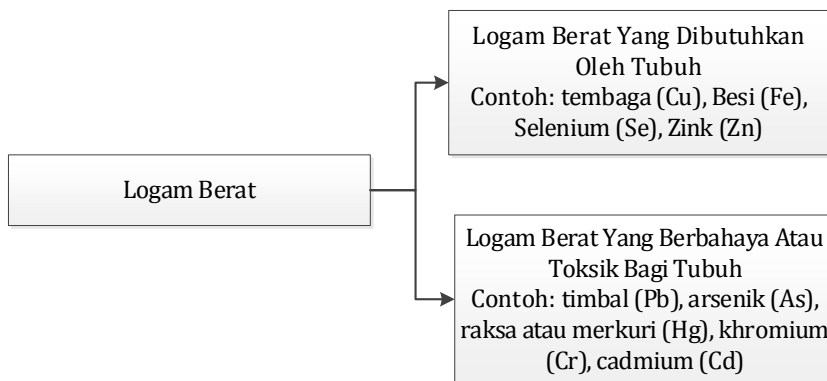
8.1 Pendahuluan

Logam merupakan suatu zat atau unsur yang memiliki nilai konduktivitas listrik yang tinggi, memiliki kelenturan yang dapat kehilangan nilai trans dalam membentuk kation. Logam dikategorikan menjadi dua kategori yaitu logam berat dan logam ringan. Logam berat merupakan logam memiliki massa sebesar 5 gram atau lebih per cm^3 (Adhani and Husaini, 2017). Sehingga disini dapat diketahui bahwa logam berat merupakan logam dengan massa lebih dari 5 gram/cm^3 . Logam ringan merupakan logam yang memiliki massa kurang dari 5 gram per cm^3 (Adhani and Husaini, 2017).



Gambar 8.1 Jenis Logam

Logam berat merupakan unsur atau komponen alam yang banyak terdapat didalam bumi dan tidak bisa dimusnakan atau didegradasi. Logam berat memiliki banyak unsur baik yang dibutuhkan oleh tubuh maupun yang toksik atau berbahaya bagi tubuh. Contoh logam berat yang bermanfaat bagi tubuh dalam jumlah kecil diantaranya tembaga (Cu), Besi (Fe), Selenium (Se), Zink (Zn) dan lain-lain. Namun banyak logam berat yang berbahaya bagi tubuh dan bersifat toksik diantaranya timbal (Pb), arsenik (As), raksa atau merkuri (Hg), khromium (Cr), cadmium (Cd), dan lain-lain (Adhani and Husaini, 2017).



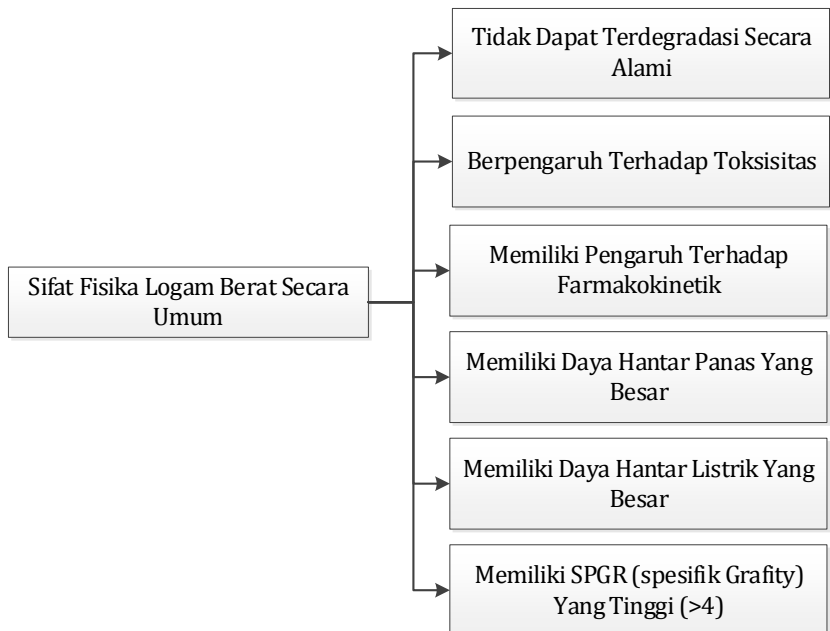
Gambar 8.2. Jenis Logam Berat

Pada bab ini akan dibahas dampak bahaya dari logam berat bagi lingkungan dan manusia. Diharapkan setelah mempelajari bab ini, pembaca akan mengetahui logam berat apa saja yang memiliki dampak bahaya bagi lingkungan dan manusia sehingga dapat menjadi informasi dan bekal bagi pembaca

didalam keamanan didalam penggunaan logam berat dikehidupan sehari-hari.

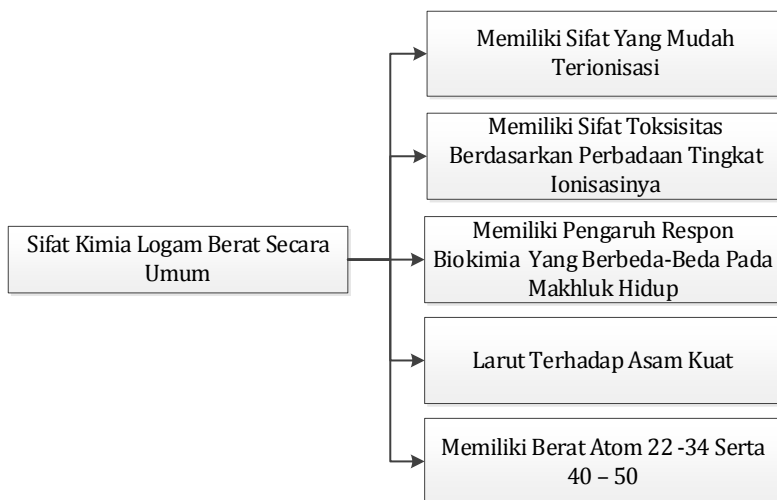
8.2 Logam Berat

Logam berat seperti disebutkan diatas merupakan suatu zat atau unsur logam yang memiliki massa lebih besar dari 5 gram per cm^3 ($\geq 5 \text{ gr/cm}^3$). Logam berat memiliki sifat fisika dan sifat kimia. Sifat fisika logam berat berupa tidak dapat terdegradasi secara alami, berpengaruh terhadap toksisitas, memiliki pengaruh terhadap farmakokinetik, memiliki daya hantar panas dan listrik yang besar, memiliki SPGR (spesifik grafity) yang tinggi (>4) (Adhani and Husaini, 2017).



Gambar 8.3 Sifat Fisika Logam Berat Secara Umum

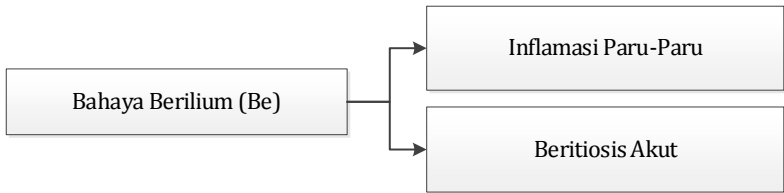
Sifat kimia logam secara umum dapat berupa memiliki sifat yang mudah terionisasi, memiliki sifat toksisitas berdasarkan perbedaan tingkat ionisasinya, memiliki pengaruh respon biokimia yang berbeda-beda pada makhluk hidup, larut terhadap asam kuat, dan memiliki berat atom 22 -34 serta 40 – 50 (Adhani and Husaini, 2017).



Gambar 8.4 Sifat Kimia Logam Berat Secara Umum

8.3 Toksisitas Berilium (Be)

Berilium merupakan logam yang banyak ditemukan di alam pada proses penambangan. Logam berilium berwarna abu-abu, sifat mekanik yang tahan panas, kokoh namun mudah pecah, dan ringan. Logam berilium digunakan di industry pelapisan logam sebagai alloy karena sifatnya yang kokoh dan sebagai pelindung serta penguat bagi logam lainnya (Astuti, 2013; Darmawan, 2013).



Gambar 8.5 Bahaya Berilium (Be)

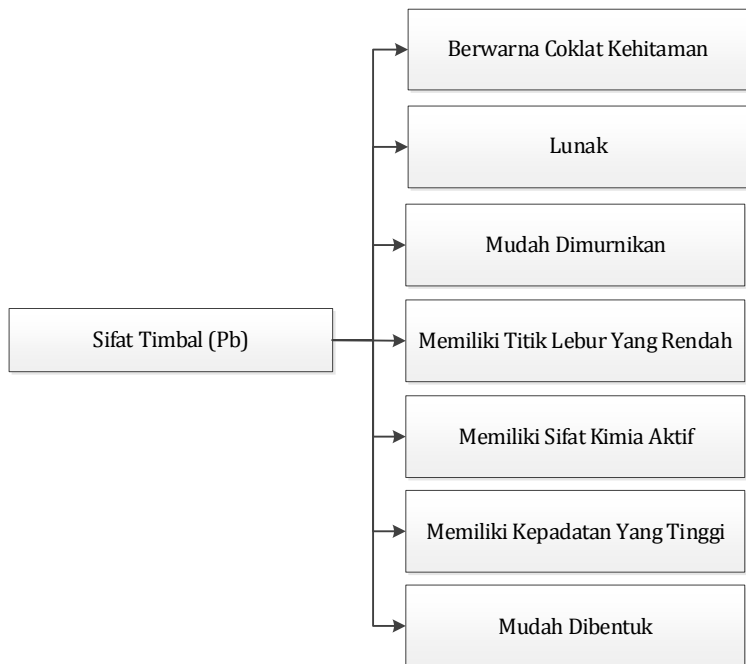
Logam berilium bahaya bagi tubuh. Berilium dalam kadar tinggi dapat menyebabkan reaksi berbahaya bagi inflamasi paru-paru sehingga menyebabkan acute ryium disease atau sering disebut beritiosis akut. Efek lain dari berilium pada tubuh berupa dapat menurunkan berat badan dan dapat menyebabkan mudah lelad. Berilium dapat masuk kedalam tubuh melalui proses pernapasan atau proses inhalasi dalam bentuk debu ataupun uap, atau melalui mulut atau pencernaan. Berilium yang terkontak atau yang terkena pada kulit dapat diabaikan atau memiliki efek yang kecil (Astuti, 2013; Darmawan, 2013).



Gambar 8.6 Sifat Berilium (Be) Secara Umum

8.4 Toksisitas Timbal (Pb)

Timbal memiliki sifat lunak, mudah dimurnikan, berwarna coklat kehitaman, memiliki titik lebur yang rendah, memiliki sifat kimia aktif, memiliki kepadatan yang tinggi dan mudah dibentuk. Timbal memiliki jumlah yang sedikit di alam. Timbal hanya terdapat 0,0002% pada lapisan kerak bumi. Timbal digunakan pada pelapisan logam karena sifatnya yang tidak mudah berkarat, produksi baterai, produksi amunisi, kosmetik, pipa, cat, keramik, solder dan kegunaan lainnya (Rakhmina, Lisa and Kartiko, 2017; Murraya, Taufiq-Spj and Supriyantini, 2018; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018).



Gambar 8.7 Sifat Timbal (Pb) Secara Umum

Timbal memiliki bahaya terhadap tubuh manusia. Beberapa efek timbal bila masuk kedalam tubuh berupa (Prasetiyono, 2015; Rakhmina, Lisa and Kartiko, 2017; Kamarati, Marlon and Sumaryono, 2018; Murraya, Taufiq-Spj and Supriyantini, 2018; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018):

- Bila keracunan timbal pada sistem saraf maka akan menyebabkan halusinasi, kerusakan otak besar, epilepsy dan dilerium.
- Bila timbal terkontaminasi pada saluran pencernaan akan menyebabkan kolik usus, terjadi gangguan aktivitas enzim α -aminolevulenat dehidratase (ALAD) pada sistem hematopoietik didalam eritoblas pada sumsum tulang serta

eritrosit yang menyebabkan sel darah merah memiliki umur yang pendek.

- Bila timbal masuk kedalam sistem reproduksi maka akan menyebabkan penurunan reproduksi bahkan menyebabkan kemandulan
- Bila timbal masuk kedalam sistem indokrin maka akan menyebabkan iodium menjadi berkurang
- Bila timbal masuk kedalam ginjal serta urinaria maka akan menyebabkan gagal ginjal
- Bila timbal masuk kedalam jantung maka akan menyebabkna fungsi jantung menjadi tidak normal.

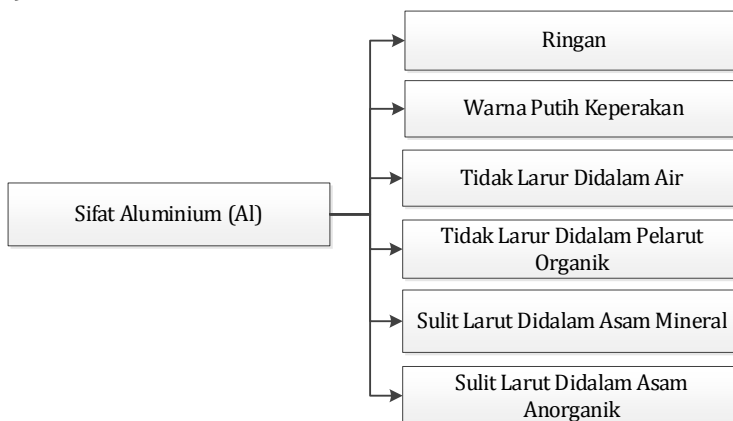
Timbal dapat terpapar melalui produk-produk yang berbahan campuran timbal seperti bensin, mainan, cat, tanah yang terkontaminasi timbal, kosmetik, debu rumah tangga dan emisi industry. Paparan ini terjadi Ketika terjadi proses pembuatan tangka yang menggunakan timbal, gas yang mengandung timbal sehingga terhirup, pemasangan pipa, ataupun penggunaan produk-produk yang memiliki kontaminan timbal. Timbal dapat masuk kedalam tubuh melalui pernapasan, pencernaan dari makanan maupun minuman, terpapar pada kulit serta tertelan bahan-bahan yang mengandung timbal (Prasetyono, 2015; Budiastuti, Raharjo and Dewanti, 2016; Dewi, 2022).

Keracunan timbal dapat menyebabkan kram perut yang akut, perubahan perilaku, anemia, kehilangan nafsu makan, penurunan libido, kemandulan, kesuburan berkurang, kelahiran premature, kecerdasan menjadi berkurang, lebih agresif, hipertensi, gangguan fungsi ginjal, penyakit kardiovaskuler, sakit kepala, alergi, keterbelakangan mental, kelelahan, halusinasi, sulit tidur, vertigo, arthritis, autism,

kelemahan otot, kerusakan ginjal, disleksia, kerusakan otak, psikosis, kerusakan otak dan dapat menyebabkan kematian tiba-tiba (Budiman *et al.*, 2017; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018; Rosita and Andriyati, 2019).

8.5 Toksisitas Aluminium (Al).

Aluminium memiliki sifat ringan, memiliki warna putih keperakan, bergumpal, tidak larur didalam air, tidak larur didalam pelarut organik, sulit larut didalam asam mineral, sulit larut didalam asam anorganik. Aluminium biasanya digunakan pada peralatan rumah tangga (seperti panci & wajan), kaleng minuman, bahan pesawat terbang, barang elektronik, peralatan memasak, aluminium foil (Kasman, Riyanti and Kartikawati, 2019).



Gambar 8.8 Sifat Aluminium Secara Umum

Aluminium bila terpapar didalam tubuh dapat menyebabkan gangguan saluran pernapasan, batuk, sesak napas, fibrosis paru, iritasi pada kulit, iritasi pada selaput

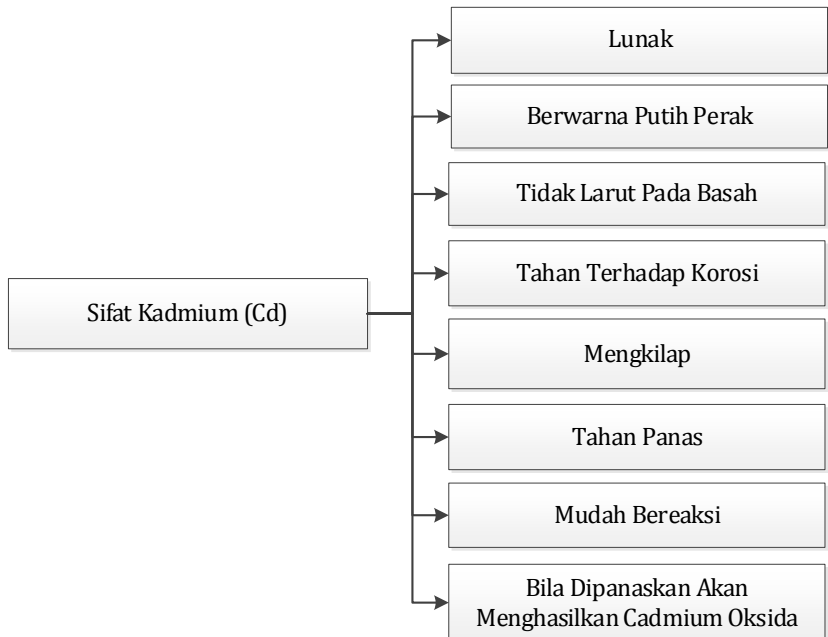
mukosa, iritasi pada mata, iritasi pada telinga, kerusakan tulang, kerusakan otak, gangguan fungsi motoric saraf, hemodialisis, osteomalacia, Alzheimer, fungsi ginjal berkurang, kanker paru-paru, dan kanker kandungan kemih. Paparan aluminium masuk kedalam tubuh melalui inhalasi (pernapasan), tertelan, makanan, dan minuman (air minum) (Istarani and Pandebesie, 2014; Adhani and Husaini, 2017; Kasman, Riyanti and Kartikawati, 2019).

8.6 Toksisitas Kadmium (Cd)

Kadmium memiliki sifat lunak, berwarna putih perak, tidak larut pada basah, tahan terhadap korosi, mengkilap, tahan panas, mudah bereaksi, dan bila dipanaskan akan menghasilkan cadmium oksida. Cadmium mempunyai nomor atom sebesar 40, memiliki titik leleh sebesar 321 °C memiliki berat atom sebesar 112,4; memiliki titik didih 767 °C serta masa jenis atau densitas sebesar 8,65 g/cm³. Kadmium biasanya digunakan pada elektrolisis, enamel, bahan pigmen cet, plastic, industry alloy, pestisida, pemurnian Zn dan kegunaan lainnya (Hananingtyas, 2017; Ramlia, Rahmi and Abidin Djalla, 2018; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018).

Kadmium merupakan logam yang sangat beracun pada tubuh. Keracunan kadmium pada tubuh dapat menyebabkan radang tenggorokan, myalgia, bronchitis, hiperkalsiuria, pneumonitis kimia pulminan, baruk, pembentukan bantu ginjal, rasa sesak pada dada, kerusakan tulang, gagal fungsi hati, nyeri kepala, mual, emfisema, demam, sesak nafas, kerusakan akud pad paru-paru, iritasi lambung, gagal ginjal akut, hingga dapat menyebabkan kematian. Paparan kadmium

masuk kedalam tubuh melalui inhalasi (pernapasan), tertelan, makanan, dan minuman (air minum) (Adhani and Husaini, 2017; Hananingtyas, 2017; Ramlia, Rahmi and Abidin Djalla, 2018; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018).

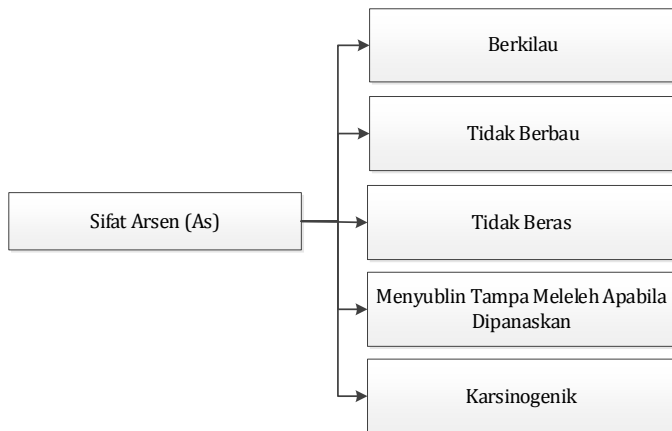


Gambar 8.9 Sifat Kadmium (Cd) Secara Umum

8.7 Toksisitas Arsen (As)

Arsen memiliki sifat berkilau, tidak berbau, tidak berasa, menyublim tanpa meleleh apabila dipanaskan dan karsinogenik atau dapat menyebabkan kanker. Arsen banyak dialam pada tanah, batuan maupun air. Logam arsen biasanya digunakan pada pestisida, insektisida, racun semut, herbisida, obat-obatan homeopati, rodentisida, cat, sabun,

semikonduktor, pewarna, racun tikus, herbisida dan kegunaan lainnya(Istarani and Pandebesie, 2014; Dewi, 2022).



Gambar 8.10 Sifat Arsen (As) Secara Umum

Arsen bila masuk kedalam tubuh akan menyebabkan pusing, sakit kepala, kelemahan otot, iritasi tenggorokan, paru bila terhirup, gejala gastrointestinal, mual, nyeri abdomen, muntah, confusion, gagal jantung dan disorientasi. Selain itu arsenic dapat menyebabkan kanker paru-paru, kanker hati, kanker kandung kemih dan kanker kulit. Paparan arsenic yang rendah dapat menyebabkan mual, muntah, berkurangnya produksi leukosit, berkurangnya produksi eritrosit, detak jantung menjadi tidak normal, tangan dan kaki terasa tertusuk-tusuk, serta kerusakan pembuluh darah (Istarani and Pandebesie, 2014; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018; Dewi, 2022).

Paparan arsen dalam jangka panjang dapat berakibat terbentuknya lesi kulit, neurologis terganggu, kanker internal, gangguan pada pembuluh darah perifer, gangguan paru-paru, hipertensi, gangguan kardiovaskular, timbulnya penyakit diabetes mellitus serta dapat menyebabkan kematian. Paparan arsen masuk kedalam tubuh melalui inhalasi (pernapasan), tertelan, makanan, dan air minum (minuman) (Adhani and Husaini, 2017).

8.7 Toksisitas Merkuri / Raksa (Hg)

Merkuri memiliki sifat berbentuk cair, berwarna putih keabu-abuan, tidak berbau, bersifat mengkilap, memiliki nomor atom 80, memiliki berat atom sebesar 200,59; memiliki titik beku sebesar -39°C , logam yang mudah menguap, memiliki ketahanan listrik yang sangat rendah, memiliki sifat daya hantar listrik yang tinggi, bahan alloy (amalgam), dan sangat beracun. Merkuri digunakan pada industri farmasi, industri pertanian, industri kertas, industri pengawet kertas, industri soda kaustik dan industri-industri lainnya (Adhani and Husaini, 2017; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018).

Logam merkuri merupakan logam yang memiliki tingkatan racun paling tinggi dibandingkan dengan logam lainnya. Merkuri bila terpapar pada tubuh dapat menyebabkan acrodynia, kerusakan pada otak, kerusakan pada ginjal, mengubah fungsi otak, tremor, mudah marah, penurunan fungsi penglihatan, penurunan fungsi pendengaran, berkurangnya kemampuan otak dan kerusakan pada janin. Paparan merkuri melalui uap dapat menyebabkan kerusakan paru-paru, diare, ruam kulit, peningkatan tekanan darah,

peningkatan denyut jantung, muntah, mual, depresi, tremor, sakit kepala, kelelahan, rambut rontok serta gejala lainnya. Paparan akan logam merkuri dapat terjadi melalui pernapasan, terpapar melalui kulit maupun tertelan melalui makanan dan minuman. Kadar merkuri pada air minum menurut peraturan baku mutu air bersih berupa kurang dari 0,001 mg/L (Rakhmina, Lisa and Kartiko, 2017; Utami, Rismawati and Sapanli, 2018; Kurniawan and Mustikasari, 2019).



Gambar 8.12 Sifat Merkuri (Hg) Secara Umum.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhani, R. and Husaini. 2017. *Logam Berat Sekitar Manusia*. 2nd edn, *Lambung Mangkurat University Press*. 2nd edn. Lambung Mangkurat University Press. Available at: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>.
- Astuti, W. 2013. Dampak Kandungan Logam Berat dalam Sampah Elektronik (E-Waste) terhadap Kesehatan dan Lingkungan. *Majalah Ilmiah Universitas Pandanaran*, 11(2).
- Budiastuti, P., Raharjo, M. and Dewanti, N.A.Y. 2016. Analisis Pencemaran Logam Berat Timbal Di Badan Sungai Babon Kecamatan Genuk Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(5).
- Budiman, A. *et al.* 2017. Kinerja Koagulan Poly Aluminium Chloride (PAC) Dalam Penjernihan Air Sungai Kalimas Surabaya Menjadi Air Bersih', *Widya Teknik*, 7(1), pp. 25–34. Available at: <http://journal.wima.ac.id/index.php/teknik/article/view/1258>.
- Darmawan, A. 2013. Penyakit Sistem Respirasi Akibat Kerja Armaidi. *JMJ*, 1(), pp. 68–83.
- Dewi, E.R. 2022. Analisis Cemarkan Logam Berat Arsen, Timbal, dan Merkuri pada Makanan di Wilayah Kota Surabaya dan Kabupaten Sidoarjo Jawa Timur', *Ikesma: Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*, 18(1), pp. 1–9. doi:10.19184/ikesma.v18i1.20529.

- Hananingtyas, I. 2017. Bahaya Kontaminasi Logam Berat Merkuri (Hg) dalam Ikan Laut dan Upaya Pencegahan Kontaminasi pada Manusia. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 2(2), pp. 38–45. doi:10.29080/alard.v2i2.120.
- Istarani, F. and Pandebesie, E.S. (2014) ‘Studi Dampak Arsen (As) dan Kadmium (Cd) terhadap Penurunan Kualitas Lingkungan’, *Jurnal Teknik Pomits*, 3(1).
- Kamarati, K.F.A., Marlon, I.A. and Sumaryono, M. 2018. ‘Kandungan Logam Berat Besi (Fe), Timbal (Pb) dan Mangan (Mn) pada Air Sungai Santan’, *JURNAL Penelitian Ekosistem Dipterokarpa*, 4(1), pp. 49–56.
- Kasman, M., Riyanti, A. and Kartikawati, C.E. 2019. ‘Fitoremediasi Logam Aluminium (Al) Pada Lumpur Instalasi Pengolahan Air Menggunakan Tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*)’, *Jurnal Daur Lingkungan*, 2(1), pp. 7–10. doi:10.33087/daurling.v2i1.17.
- Kurniawan, A. and Mustikasari, D. 2019. Review: Mekanisme Akumulasi Logam Berat di Ekosistem Pascatambang Timah’, *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), p. 408. doi:10.14710/jil.17.3.408-415.
- Murraya, Taufiq-Spj, N. and Supriyantini, E. 2018. Content of Heavy Metal Iron (Fe) in Water, Sediment, and Green Shellfish (*Perna viridis*) in Tanjung Emas Waters, Semarang. *Journal of Marine Research*, 7(2), pp. 133–140.
- Prasetyono, E. 2015. Kemampuan Kompos Dalam Menurunkan Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Pada Media Budidaya Ikan. *Jurnal Akuatika*, 6(1).

- Rakhmina, D., Lisa, L. and Kartiko, J.J. 2017. Logam Merkuri pada Masker Pemutih Wajah di Pasar Martapura', *Medical Laboratory Technology Journal*, 3(2), pp. 53–57. doi:10.31964/mltj.v3i2.172.
- Ramlia, R., Rahmi and Abidin Djalla. 2018. Uji Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Di Perairan Wilayah Pesisir Parepare', *Jurnal Ilmiah Manusia Dan Kesehatan*, 1(3), pp. 255–264. doi:10.31850/makes.v1i3.111.
- Rosita, B. and Andriyati, F. 2019. Perbandingan Kadar Logam Kadmium (Cd) Dalam Darah Perokok Aktif Dan Pasif Di Terminal Bus. *Sainstek : Jurnal Sains dan Teknologi*, 11(2), pp. 70–77. doi:10.31958/js.v11i2.1576.
- Utami, R., Rismawati, W. and Sapanli, K. 2018. Pemanfaatan Mangrove untuk Mengurangi Logam Berat di Perairan. *Prosiding Seminar Nasional Hari Air Dunia* [Preprint].

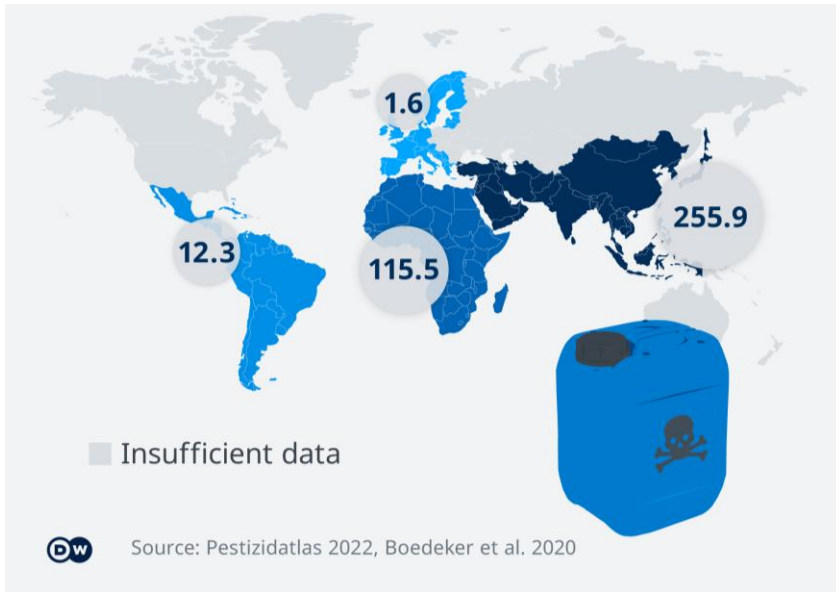
BAB 9

TOKSISITAS PESTISIDA

Oleh Abdullah Muamar

9.1 Pengertian Pestisida

Pestisida adalah zat yang digunakan untuk mengendalikan hama atau gulma. Pestisida dapat dibuat dari bahan kimia sintetik dan kimia organik yang diambil dari senyawa bioaktif tumbuhan. Beberapa jenis hama yang paling banyak dijumpai seperti serangga, rumput liar, jamur dan hewan pengerat. Beberapa hama serangga dapat membawa vektor penyakit seperti malaria, filariasis, tifus, pes, demam kuning dan lain sebagainya. Penggunaan pestisida yang tidak sesuai dapat memberikan dampak buruk bagi tubuh yaitu menimbulkan keracunan. Beberapa faktor yang mempengaruhi penggunaan pestisida yaitu pengetahuan petani saat menggunakan pestisida dan tidak menggunakan alat pelindung saat sedang menggunakan pestisida.



Gambar 9.1. Keracunan pestisida Akut di beberapa negara
Sumber: www.dw.com

Hasil penelitian dari jurnal Public Health tahun 2022 terdapat 385 juta orang di bidang pertanian jatuh sakit karena keracunan pestisida akut setiap tahun. Pada gambar 1.1 menunjukkan terdapat 256 juta keracuna pestisida di Asia, 116 juta di Afrika, 12,3 juta di Amerika Latin dan 1,6 juta di Eropa. Gejala yang ditimbulkan akibat dari keracunan pestisida. Badan pengawas obat dan makanan merilis kasus keracunan di Indonesia tahun 2022, terdapat setidaknya 40,62 kasus keracunan saat menggunakan pestisida. Bahan aktif pestisida dapat diperoleh dari dua jenis zat kimia yaitu pestisida sintetik dan pestisida organik. Pestisida sintetik adalah pestisida yang dibuat dari pencampuran bahan-bahan kimia. Sedangkan,

pestisida organik (biopestisida) adalah pestisida yang bahan aktifnya di ambil dari tumbuhan. Pestisida berdasarkan sasaran penggunaannya, dibedakan menjadi beberapa macam, antara lain:

Tabel 9.1. Jenis-Jenis pestisida berdasarkan sasaran penggunaannya.

No	Jenis pestisida	Asal (dalam bahasa latin)	kataArti Kata	Fungsi
1.	Akarisida	Akari	Tungau	Membunuh tungau
2	Algasida	Algae	Ganggang laut	Membunuh ganggang atau alga
3.	Bakterisida	Bacterium	Bakteri	Membunuh Bakteri
4.	Fungisida	Fungus	Jamur	Membunuh atau menekan pertumbuhan jamur
5.	Herbisida	Herba	Tanaman setahun	Membunuh gulma atau tanaman liar
6.	Insektisida	Insectum	keratan segmen tubuh	Membunuh serangga
7.	Molluskisida	Molluscus	Berselubung tipis atau lembek	Membunuh siput
8.	Nematisida	Nematoda	Benang	Membunuh cacing
9.	Ovisida	Ovum	Telur	Merusak telur
10.	Pedukulisida	Pedis	Kutu, tuma	Membunuh kutu atau tuma
11	Piscisida	Piscis	Ikan	Membunuh ikan
12.	Rodensida	Rodere	Pengerat	Membunuh tikus
13.	Termisida	Termes	Serangga pelubang kayu	Membunuh rayap

Bahan aktif pestisida sintetik terbuat dari campuran bahan kimia yang dapat diproduksi dalam jumlah yang besar, biasanya diproduksi oleh sebuah perusahaan bidang pertanian. Keunggulan dari pestisida sintetik yaitu banyaknya jenis pestisida yang dapat dihasilkan dengan berbagai ukuran, harga beli relatif murah dan dapat dengan cepat menurunkan jumlah populasi hama dan gulma. Disamping keunggulan tersebut terdapat dampak negatif dalam pemakaian pestisida seperti bahan cemaran dapat merusak lingkungan. Karena, pestisida yang di aplikasikan ke sebuah perkebunan dengan paparan terus menerus akan merusak ekosistem sebuah perkebunan. Pestisida juga akan hanyut ke ekosistem perairan yang dapat menyebabkan keracunan pada ikan. Paparan pestisida yang berulang dapat menyebabkan terjadinya penurunan jumlah populasi tumbuhan atau hewan yang bukan target untuk dikendalikan. pestisida yang disemprotkan ke tanaman akan meninggalkan residu yang dapat mematikan predator alami sebuah hama yang akan berdampak pada meningkatnya jumlah hama. Selain itu, sayuran dan buah-buahan yang masih terdapat residu juga akan masuk ke tubuh manusia dan menyebabkan keracunan.

Pestisida sintetis berdasarkan sifat kimia diantaranya seperti organofosfat, karbanat dan peretroid. Paparan zat kimia tersebut pada tubuh manusia dapat menimbulkan keracunan.

9.2 Toksisitas Pestisida Sintetik

Pestisida masuk ke tubuh manusia melalui tiga jalan masuk yaitu dermal contamination (melalui kulit); inhalation (saluran pernapasan); dan oral (lewat mulut). Petani yang tidak menggunakan baju pelindung dapat terpapar pestisida dari droplet pestisida yang terbawa oleh angin sehingga menempel dikulit. Keracunan pestisida dapat disebabkan oleh dua faktor yaitu lamanya kontak kulit dengan pestisida dan luasnya area kulit yang terpapar pestisida. Selain masuk melalui kulit, pestisida juga dapat masuk melalui sistem pernapasan yang terhirup saat mengamplifikasi pestisida. Gas atau uap yang akan masuk ke paru-paru dan bentuk partikel yang menempel pada selaput lendir hidung dan kerongkongan. Jalan masuk selanjutnya melalui mulut dan masuk ke dalam saluran pencernaan. Keracunan lewat mulut dapat terjadi karena makan, minum dan merokok ketika bekerja menggunakan pestisida. Adapun gambaran fisiologi toksik yang disebabkan oleh pestisida sintetik, antara lain:

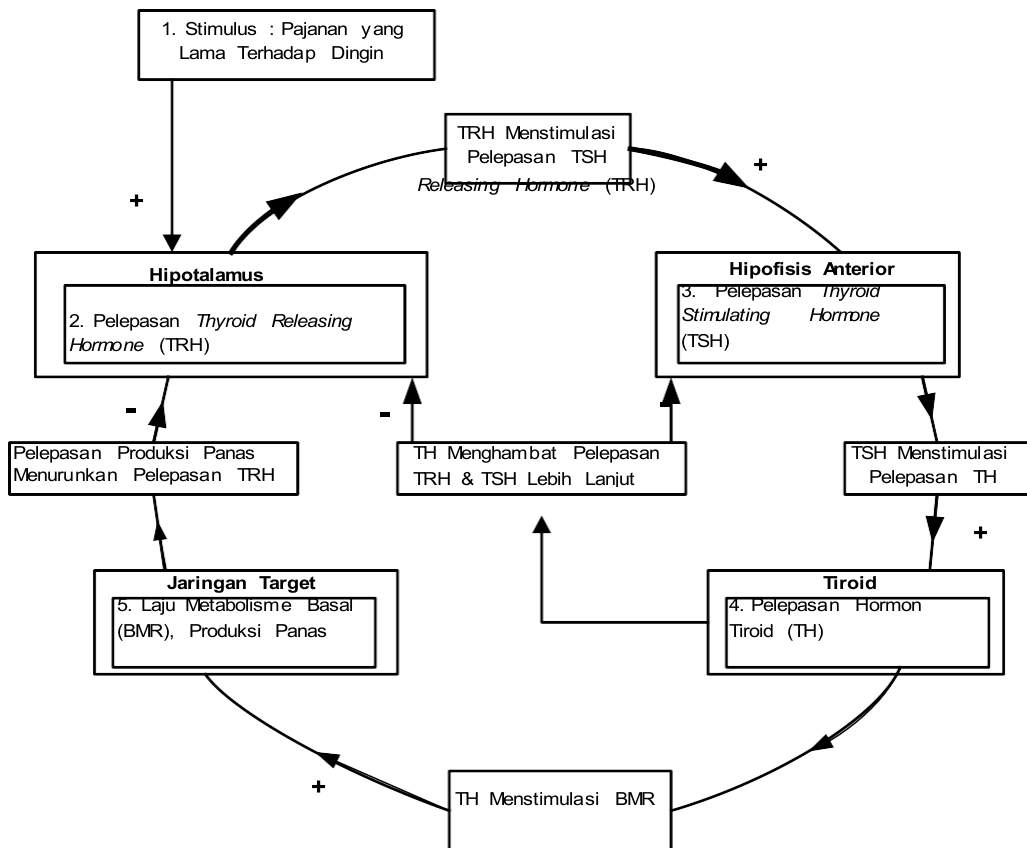
1. Mencegah terbentuknya hormon tiroid

Organoklorin adalah zat aktif pestisida yang bersifat lipofilik. Karena bersifat lipofilik pestisida organoklorin dapat dengan mudah diserap oleh jaringan kulit dan akan terakumulasi di jaringan lemak. Salah satu dampak yang ditimbulkan oleh senyawa organoklorin di dalam tubuh dapat mengganggu fungsi hormon tiroid. Oleh karena itu, organoklorin dikenal sebagai "*hormone disruptor*".

Hormon tiroid di dalam tubuh berfungsi untuk membantu proses metabolisme, maturasi dan diferensiasi sel, membantu sintesis berbagai protein, berperan

dalam maturasi (pematangan) jaringan saraf dan otak dan meningkatkan meningkatkan kepekaan tubuh terhadap katekolamin. Ketokalamine adalah hormon yang dilepaskan ke aliran darah sebagai respon terhadap stres fisik. Hormon yang dimaksud adalah epinephrine dan norepinephrine. Kedua jenis hormon tersebut memiliki pengaruh terhadap proses neurotransmitter otak. Misalnya norepinephrine berfungsi sebagai neurotransmitter saraf simpatik. Norepinephrine menstimulasi reseptor adrenergik α , β_1 , dan β_2 .

Hormon tiroid diproduksi oleh kelenjar hipofisis anterior yang menghasilkan dua jenis hormon yaitu T3 dan T4. Hormon ini bisa diproduksi karena distimulasi oleh thyroid stimulation hormone (TSH). Dalam prosesnya hormon tiroid dibentuk ketika molekul ion iodine disatukan dengan tiroglobulin. Sintesis tersebut membentuk iodotirosine. Dua jenis iodotirosine kemudian menyatu membentuk hormon T3 dan T4. Secara umum proses umpan balik hormon tiroid di dalam tubuh dapat dilihat pada Gambar 9.2.



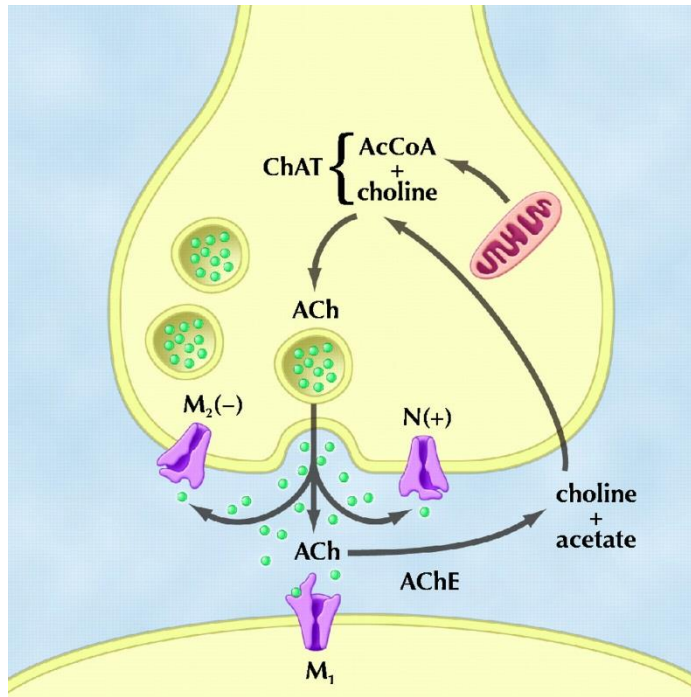
Gambar 9.2. Proses stimulasi hormon tiroid dan umpan balik.
Sumber: Corwin 2009.

Zat kimia Organoklorin mengandung ion klor. Ion klor memiliki daya ikat yang lebih kuat dari ion iodine sehingga menjadi kompetitif untuk mengikat tiroglobulin. Karena tiroglobulin diikat oleh ion klor maka, hormon T3 dan T4 tidak dapat dibentuk. Berkurangnya hormon tiroid

dalam tubuh hipotalamus kemudian memberikan stimulus untuk mensekresikan TSH. Sekresi TSH secara terus menerus menyebabkan kadar TSH meningkat di dalam darah. Meskipun sekresi TSH meningkat, pembentukan hormon tiroid tetap terganggu. Menurunnya hormon tiroid dan meningkatnya kadar TSH dalam darah disebut dengan penyakit hipotiroid. Gejala yang dirimbulkan pada penderita hipotiroid adalah mudah lelah, lesu, intoleran terhadap suhu dingin, nyeri sendi dan kram otot, adanya penambahan berat badan, kulit kering, rambut rontok dan gondok.

2. Mengikat enzim hidroksi asetilkolinesterase

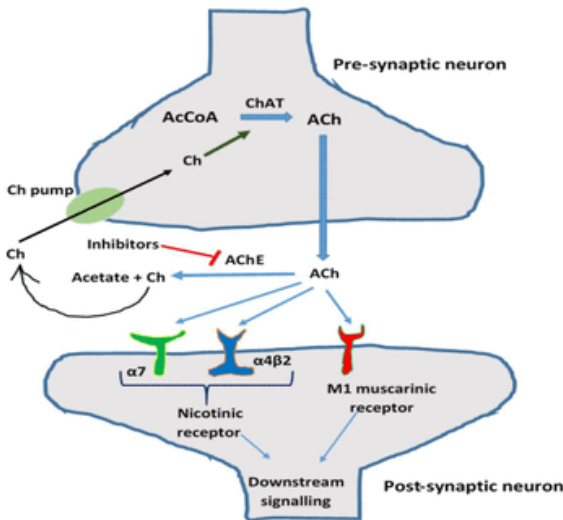
Pestisida selain menggunakan bahan kimia organoklorin juga menggunakan organofosfat dan karbamat. Pestisida ini dapat menghambat penyaluran impuls saraf dengan cara mengikat asetilkolinesterase, sehingga hidrolisis asetilkolin tidak terjadi. Asetilkolinesterase adalah enzim yang berfungsi untuk menjaga kerja otot, kelenjar dan sel syaraf agar tetap bekerja dengan baik. Asetilkolinesterase terletak di antara ujung saraf pada sistem saraf pusat dan jaringan saraf tepi (perifer) juga pada jaringan otot yang berfungsi untuk meneruskan rangsangan saraf. Ketika organofosfat dan karbamat menempel pada enzim Hidroksi asetilkolinesterase (AChE) menyebabkan enzim tidak dapat memecah asetilkolin menjadi kolinesterase dan asam asetat. perhatikan Gambar 9.3.



Gambar 9.3. Mekanisme kerja Organogofat pada reseptor AChE. (Sumber: www.medrxiv.org)

Karena hidrolisis terganggu mengakibatkan terjadi akumulasi asetilkolin pada reseptor dan menimbulkan efek rangsangan pada reseptor kolinergik baik sebelum (preganglionic) dan sesudah ganglion (postganglionic). Terdapat dua jenis reseptor kolinergik yaitu kolinergik yang bereaksi dengan alkaloid muskarinik dan kolinergik yang bereaksi dengan nikotinik. Reseptor Muskarinik dibedakan menjadi M₁ dan M₂. Reseptor M₁ terletak di

ganglia otonom dan sistem saraf pusat dan Reseptor M2 terletak pada jantung dan kelenjar ludah. Efek yang terjadi ketika reseptor muskarinik terganggu dapat terjadi pada jantung: lambatnya denyut jantung dan hipotensi. Pernapasan: keluarnya cairan hidung, sesak nafas dan batuk. Pencernaan: air liur yang banyak, mual, muntah, nyeri perut dan diare. Reseptor Nikotinik dapat ditemukan di neuromuscular junction, ganglia otonom, medula adrenal dan susunan saraf pusat. Tetapi, reseptor ini paling banyak ditemukan di neuromuscular junction (sinaps yang terjadi antara saraf motorik dengan serabut otot). Akibatnya, apabila reseptor nikotinik terganggu dapat menyebabkan kelemahan otot. Perhatikan Gambar 9.4.



Gambar 9.4. reseptor muscarinic dan reseptor nikotinik
 Sumber: www.cmaj.ca

Beberapa jenis organofosfat dan karbamat juga dapat berinteraksi dengan enzim neuropati target esterase (NTE). Enzim ini dapat ditemukan pada sistem syaraf otak dan saraf di medula spinalis (tulang belakang). Terganggunya enzim ini dapat menyebabkan *Chronic Organophosphate Induced Neuropsychiatric Disorder* (COPIND). COPIND adalah salah satu gangguan degenerasi sel saraf otak dan saraf medula spinalis yang disebabkan oleh organofosfat. COPIND dapat menyebabkan nekrosis dan apoptosis. Nekrosis merupakan kondisi cedera pada sel yang mengakibatkan kematian dini sel-sel dan jaringan hidup sedangkan apoptosis adalah kematian sel pada saat proses perkembangan sel. Salah satu tanda dari COPIND, melambatnya atau menurunnya waktu reaksi (respon). Waktu reaksi ini digunakan untuk menjadi parameter fisiologis guna mengetahui seberapa cepat waktu pemrosesan pada sistem saraf pusat dan koordinasi antara sensorik dan motorik ketika seseorang mendapatkan stimulus.

3. Paparan kronis organofosfat terhadap karsinogenesis.

Organofosfat selain dapat mengikat enzim asetilkolinesterase juga dapat menyebabkan karsinogenesis (proses terbentuknya sel kanker). Faktor utama terjadi karsinogenesis adalah aktivitas alkilasi. Organofosfat dikenal sebagai ester asam fosfat (OPE) dengan struktur molekul $O=P(OR)_3$ yaitu terdiri 1 molekul fosfat yang dikelilingi 2 gugus organik (R1 dan R2) serta gugus (X). Gugus (R) merupakan bagian yang paling mudah

terhidrolisis menjadi gugus alkil (aromatik). Semua jenis Alkil fosfat yang sudah teresterisasi memiliki tingkat karsinogenik yang tinggi sebagai efek dari peningkatan aktifitas alkilasi.

Alkilasi melibatkan reaksi guanine dalam DNA. Alkil mengikatkan diri ke basis DNA. Proses pengikatan ini menyebabkan terjadinya alterasi (perubahan komposisi DNA). DNA kemudian dipecah menjadi dua bagian oleh enzim nuklease. Proses pemecahan merupakan usaha tubuh untuk menghilangkan basis alkali. Selanjutnya, alkilasi merusak formasi cross-bridges ikatan antar atom. Dalam proses ini dua alkil kemudian dihubungkan dan memiliki dua gusus pengikat DNA. Alkali ini kemudian menyebabkan kesalahan pemasangan nukleotida yang berujung pada terjadinya mutasi.

9.3 Biopestisida toksik terhadap hama tapi ramah lingkungan

Biopeptisida adalah pestisida yang bahan aktifnya berasal dari tumbuhan dan hewan yang tidak meninggalkan residu yang berbahaya bagi tanaman ataupun lingkungan. Terdapat dua jenis biopestisida yaitu biopestisida nabati dan biopestisida hewani. Bahan aktif untuk membuat pestisida hewani tidak sebanyak pestisida nabati yang dapat dijumpai pada tumbuhan obat. Pestisida hewani dapat dibuat dari urin sapi yang digunakan untuk pemberantasan penyakit yang disebabkan oleh virus dan cendawan. Residu biopeptisida mudah terurai (biodegradable) di alam sehingga tidak mencemari lingkungan dan aman bagi manusia dan hewan

ternak. Pestisida ini dapat berfungsi sebagai antifeedant (penghambat nafsu makan), repellent (tanaman penolak hama), attractant (penarik) dan dapat menghambat perkembangan. Tumbuhan yang dapat digunakan menjadi pestisida terdapat 1000 spesies tanaman, 380 spesies sebagai antifeedant, 270 spesies sebagai repellent, 35 spesies dapat menjadi akarisida dan lebih dari 30 spesies mengandung zat penghambat pertumbuhan. Beberapa tumbuhan yang dapat dijadikan biopeptisida:



Daun Jelatang



Daun Sirsak



Daun Biduri



Daun Jarak Pagar



Tagetes patula L

Sumber: www.amazon.com



Daun Kiriuh

Sumber:
www.socfindoc
onservation.co.
id

Gambar 9.5. Beberapa tumbuhan yang dapat dijadikan biopeptisida

1. Daun Jelatang (bio insektisida)

Daun jelatang dapat dijadikan bioinsektisida pembasmi larva nyamuk, karena mengandung senyawa bioaktif seperti alkaloid, saponin, tanin, terpenoid dan flavonoid. Senyawa tanin dapat bertindak sebagai racun perut; terpenoid berfungsi sebagai antifeedant dan memblokir reseptor rasa di mulut larva yang mengakibatkan larva tidak menerima rangsangan rasa, sehingga tidak dapat mengenali makanannya dan larva akan mati kelaparan. Alkaloid berfungsi sistem kerja saraf larva dengan menghambat kerja enzim asetilkolinesterase. Hal ini mengakibatkan terjadinya penumpukan asetilkolin yang menyebabkan menurunnya sistem penghantar impuls ke sel-sel otot, sehingga larva mengalami kekejangan dan berakhir dengan kematian. Ciri fisik yang ditunjukkan terjadi perubahan warna tubuh larva menjadi transparan dan gerak larva menjadi melambat bila dirangsang sentuhan selalu membengkokkan badannya.

Senyawa saponin mengandung glikosida yang dapat larut dalam air. Senyawa ini berfungsi untuk mengurangi aktivitas enzim pencernaan dan penyerapan makanan pada larva karena senyawa tersebut berperan menurunkan tegangan permukaan selaput mukosa traktus digestivus larva sehingga dinding digestivus menjadi korosif. Saponin akan masuk ke dalam tubuh larva melalui kulit, masuk ke jaringan hemolimfa masuk ke dalam tubuh larva yang akan merusak organ-organ dalam tubuh larva. Kerusakan ini akan mengganggu proses respirasi sel. Flavonoid berfungsi untuk menghambat makan serangga

karna bersifat racun, sehingga mengakibatkan gangguan sistem pencernaan larva *Aedes aegypti*. Retenon merupakan turunan dari flavonoid untuk menghambat enzim pernapasan larva yang mengakibatkan terjadinya kegagalan fungsi pernapasan. Steroid berfungsi menghambat proses molting larva, mengganggu struktur octopamine yang mengakibatkan terjadinya gangguan aktivitas larva sehingga meningkatkan mortalitas larva. Senyawa ini juga dapat menghambat sterol carrier protein (SCP) sehingga larva tidak dapat mengubah sterol menjadi kolesterol dan kemudian akan mengganggu proses pertumbuhan dan perkembangan larva.

2. Daun Sirsak (Bio Fungisida)

Daun sirsak dapat dijadikan biofungisida karena mengandung senyawa annonain (senyawa golongan alkaloid). Selain itu daun sirsak mengandung flavonoid, saponin, tanin, glikosida, alkaloid polifenol, terpen, acetogenins dan lektin. Senyawa tanin dan acetogenin menjadi beracun ketika sampai pada usus. Tanin menghambat aktivitas enzim pada saluran pencernaan dan acetogenin meracuni sel-sel saluran pencernaan. Tanin merupakan senyawa yang dapat menghambat ketersediaan protein dengan membentuk kompleks protein yang tidak dapat dicerna oleh serangga.

Aktivitas senyawa antifungal memiliki mekanisme dengan cara menghambat germinasi spora untuk tumbuh menjadi miselium. Dinding sel jamur dapat terganggu karena adanya sintesis kitin oleh lektin. Flavonoid dan polifenol

bersifat antiseptis dan desinfektan bekerja dengan cara denaturasi dan koagulasi. Senyawa fenol dan turunannya dapat merusak permeabilitas sel dan membran sel sehingga mengakibatkan kebocoran sel. Gangguan pada membran sel disebabkan karena adanya ergasol dalam sel fungi. Ergosol ini adalah komponen sterol yang sangat penting dan mudah untuk diserang oleh antibiotik turunan polien.

Dalam sel fungi juga terjadi mekanisme penghambatan ergosterol yang disebabkan oleh senyawa turunan imidazol. Emidazol merupakan senyawa turunan alkaloid. Emidazol mampu menimbulkan ketidakaturan membran sitoplasma fungi dengan mengubah permeabilitas membran dan fungsi membran dalam proses pengangkutan senyawa-senyawa yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan metabolik sehingga menghambat pertumbuhan dan kematian sel fungi.

3. Dau Biduri (Bio Akarisida)

Daun biduri mengandung flavonoid, saponin, tanin, fenol, triterpenoid dan alkaloid. Saponin bersifat racun perut dan racun pernapasan tungau. Senyawa saponin juga dapat merusak membran sel dan mengganggu proses metabolisme tungau. Tanin berpengaruh terhadap tekanan osmotik sel sehingga sel menjadi mengerut dan mengakibatkan tungau mati. Flavonoid bersifat sebagai inhibitor sistem respirasi dan mengganggu mekanisme energi di mitokondria dengan menghambat sistem pengangkutan elektron. Senyawa lain seperti fenol,

triterpenoid, alkaloid dan steroid berfungsi sebagai antifedant atau menghambat proses makan tungau.

4. Bio Moluskisida

Selain dapat digunakan sebagai bio akarisida daun biduri dan daun pepaya dapat menjadi biomoluskisida untuk mengendalikan hama keong mas. Setiap bagian tumbuhan biduri mengandung berbagai macam senyawa kimia yang bisa dimanfaatkan menjadi racun hama seperti flavonoid, tanin, saponin, polifenol. Sedangkan, pada ekstrak daun pepaya mengandung alkaloid, steroid, asam fenolat dan saponin. Dan senyawa bioaktif yang paling banyak dari daun biduri dan daun pepaya adalah saponin. Saponin dapat menyebabkan gangguan sel dan mempengaruhi organ pernafasan melalui interaksi hidrofobik karena senyawa ini mempunyai struktur bipolar yang bersifat hidrofilik dan hidrofobik. Karena bersifat hidrofilik dan hidrofobik saponin dapat menyatukan senyawa polar dan non polar termasuk lapisan lemak dalam air.

Dalam prosesnya, seponin akan berinteraksi dengan membran sel dengan cara menurunkan tegangan permukaan membran sel. Dalam proses ini terjadi peningkatan permeabilitas membran sel. Damaknya, membran sel akan mengalami kebocoran dan gangguan metabolisme pada sel sehingga menyebabkan kematian keong mas. Selain memiliki kandungan senyawa saponin yang tinggi juga memiliki kandungan papain. Papain merupakan enzim yang terdapat pada semua bagian

tanaman pepaya kecuali akar. Enzim ii akan menyerang sistem saraf dengan cara menghambat aktifitas asetilkolinesterase (AChE). AChE bekerja dengan cara memecah asetilkolin menjadi kolin dan asam asetat. proses ini terjadi pada celah sinapsis. Saat aktivitas hidrolisis asetilkolinesterase terhambat, mengakibatkan terjadi penumpukan asetilkolin dan menimbulkan efek rangsangan pada reseptor sehingga terjadi kelumpuhan, kejang dan kematian. Ciri fisik keong mas terdampak biomoluskisida ditandai tubuh menjorok keluar, operculum terbuka dan mengeluarkan lendir berlebihan.

5. Biji Jarak (Bio Rodentisida)

Biji jarak pagar memiliki senyawa bioaktif curcin dan phorbol ester yang bersifat racun membunuh tikus. Kadar phorbol ester berfungsi sebagai antifedant yang menghambat nafsu makan. Senyawa phorbol ester yang masuk ke dalam tubuh tikus dapat mengganggu metabolisme tubuh tikus, merusak sel dan melumpuhkan sel saraf sehingga menyebabkan kematian pada mencit. Ciri fisik yang dapat diamati yaitu keluarnya cairan kuning kecoklatan pada feses. Ini terjadi karena adanya kerusakan pada sistem pencernaan tikus.

6. *Tagetes patula* L. (Bio Nematosisida)

Ekstrak tanaman *Tagetes patula* L. Memiliki kandungan bioaktif berupa α -terthienyl. Senyawa ini dapat menghambat ovoposisi dan penetasan telur nematoda di sekitar rhizosfer. Senyawa α -terthienyl dapat menghambat

enzim asetil kolinesterase sehingga tidak terjadi pemecahan asetilkolin menjadi kolin dan asam asetat. selain mengandung senyawa *α -terthienyl* juga terdapat senyawa lainnya seperti patuletin, patulitrin, rutin, quercetin an quercetagetin yang berfungsi sebagai repellent dan menghambat mobilitas nematoda juvenil. Senyawa-senyawa tersebut merupakan turunan flavonoid. Senyawa quercetin berfungsi sebagai repellent dan menginduksi pergerakan nematoda sehingga menjadi lambat. Senyawa quercetagetin dan tagettin berfungsi untuk menghambat penetasan telur nematoda.

7. Tanaman Kirinyuh (Bio Herbisida)

Tanaman kirinyuh banyak dijumpai sebagai gulma. Walaupun sebagai gulma tanaman kirinyuh dapat digunakan sebagai bioherbisida karena mengandung senyawa bioaktif alelokimia seperti flavonoid, alkaloid, tanin, saponin dan fenolik. Dalam mekanismenya alelokimia akan masuk ke membran plasma tanaman target sehingga hilanglah permeabilitas membran dan fungsi enzim ATP ase. Hal ini berpengaruh pada penyerapan ion dan air, mempengaruhi pembukaan stomata dan proses fotosintesis. Alelokimia juga menghambat proses sintesis protein, pigmen dan senyawa karbon lain serta aktivitas beberapa fitohormon. Hambatan yang terjadi menyebabkan terganggunya pembelahan dan perbesaran sel yang akhirnya menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Ekstrak daun kirinyuh juga mempengaruhi kandungan klorofil a, klorofil b, dan karotenoid pada daun tanaman. Peurunan kadar pigmn fotosintetik pada gulma kirinyuh disebabkan oleh senyawa alelokimia yang merusak permeabilitas membran sel sehingga berdampak pada organel lain di dalamnya seperti mitokondria, kloroplas dan vakuola. Terhambatnya aktivitas kloroplas mempengaruhi sintesis klorofil dan karotenoid. Di samping itu, alelokimia juga mempengaruhi transportasi electron dalam kloroplas dan mitokondria sehingga menghambat photosystem II.

Mitokondria berfungsi untuk menghasilkan energi. Jika terjadi penghambatan pada mitokondria dan kloroplas rantai transport elektron menyebabkan terjadinya kehilangan energi sel yaitu NADPH, FAD dan ATP serta produk metabolisme. Hilangnya sumber energi pada sel tanaman, maka pembentukan klorofil dan proses fotosintesis akan menurun serta metabolit primer juga terhambat. Ketika sintesis klorofil menurun maka sintesis karotenoid juga ikut akan menurun karena proses sintesisnya diregulasi oleh fotoreseptor yang sama yaitu fitokrom.

DAFTAR PUSTAKA

- Mulia, R. 2005. *Kesehatan lingkungan. Graha Sains, Yogyakarta.*
- Kurniawidjaja, L. M., Lestari, F., Tejamaya, M. & Ramadhan, D. H., 2021. *Konsep Dasar Toksikologi Industri.* Depok: fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia.
- Wardhana, W. A., 2004. *Dampak Pencemaran Lingkungan.* Yogyakarta: ANDI Offset.

BAB 10

TOKSIKOLOGI BAHAN TAMBAHAN PANGAN

Oleh Windi Wulandari

10.1 Pendahuluan

Makanan yang dikonsumsi oleh masyarakat mendapatkan jaminan keamanan pangan oleh pemerintah melalui pengaturan penggunaan bahan tambahan pangan (BTP) dengan tujuan agar makanan tetap aman dan higienis jika dikonsumsi (Republik Indonesia, 2012). Bahan tambahan pangan adalah bahan yang ditambahkan ke dalam pangan dengan tujuan memperbaiki sifat dan bentuk pangan (BPOM RI, 2019). Penggunaan bahan tambahan pangan sebenarnya sudah ada sejak ratusan tahun yang lalu. Akan tetapi pada saat ini penggunaan bahan tambah pangan pada perdagangan pangan menjadi problematika tersendiri, maraknya penggunaan bahan tambahan pangan yang tidak diizinkan menjadi masalah bagi konsumen yang mengonsumsi. Produsen pangan menggunakan bahan tambahan pangan yang tidak diizinkan bertujuan untuk mendapatkan keuntungan tanpa memperhatikan dampak yang ditimbulkan bagi kesehatan manusia.

Bahan tambahan pangan yang tidak diizinkan jika ditambahkan dalam pangan dapat berdampak pada kesehatan manusia yang mengonsumsinya, efek jangka panjang jika

manusia mengonsumsi secara akumulasi dapat menyebabkan penyakit seperti kanker. Sedangkan, efek jangka pendek dapat menyebabkan mual dan sakit kepala, gatal-gatal dan muntah, gangguan hati, dan menurunnya konsentrasi belajar. Bahan yang dilarang digunakan dalam pangan sebagai bahan tambahan pangan dan sering digunakan oleh produsen pangan adalah formalin, boraks, rhodamin B, dan metanil yellow (Chikmah and Maulida, 2019). Penambahan bahan tambahan pangan yang tidak diizinkan pada pangan ini disebabkan kurangnya pengetahuan produsen skala kecil terhadap bahaya keamanan pangan.

10.2 Bahan Tambahan Pangan (BTP)

Bahan Tambahan Pangan adalah zat yang ditambahkan pada saat proses pembuatan, pemrosesan, penyiapan, perlakuan, pengepakan, pengangkutan atau penyimpanan makanan sehingga menghasilkan baik secara langsung maupun tidak langsung produk yang mempengaruhi karakteristik makanan tersebut baik warna, bentuk, rasa, tekstur, dan masa penyimpanan (FAO/WHO, 2021). Menurut BPOM (2019) bahan tambahan pangan merupakan zat atau unsur yang ditambahkan atau dicampur ke dalam makanan dengan tujuan mempengaruhi sifat dan bentuk pangan (BPOM RI, 2019).

Bahan tambahan pangan yang digunakan harus sesuai dengan persyaratan untuk bisa dikonsumsi secara langsung dan/atau tidak digunakan sebagai bahan utama pangan. Bahan tambahan pangan baik yang memiliki nilai gizi maupun tidak dapat digunakan ke dalam pangan dengan tujuan teknologi pada proses pembuatan sampai penyimpanan dan/atau

pengangkutan pangan sehingga menghasilkan komponen atau mempengaruhi sifat pangan. Bahan tambahan pangan yang digunakan bukan bahan yang mengandung cemaran.

Bahan tambahan pangan yang digunakan harus sesuai dosis di bawah ambang batas yang ditetapkan. Batas maksimum penetapan penggunaan bahan tambahan pangan mempertimbangkan persyaratan kesehatan berbasis bukti ilmiah, *ADI (Acceptable Daily Intake)* dengan batas toksisitas sangat rendah jenis ini ditetapkan untuk penggunaan harian, serta kajian paparan konsumsi produk pangan (Nuraini, 2016).

10.2.1 Golongan dan jenis Bahan Tambahan Pangan

Bahan tambahan pangan memiliki 27 golongan yang meliputi:

- a. Antibuih (*antifoaming agent*), berfungsi mencegah atau mengurangi pembentukan buih
- b. Antikempal (*anticaking agent*), berfungsi mencegah menggumpalnya produk pangan
- c. Antioksidan (*antioxidant*), berfungsi mencegah dan menahan kerusakan akibat oksidasi
- d. Bahan pengarbonasi (*carbonating agent*), berfungsi membentuk karbonasi dalam pangan
- e. Garam pengemulsi (*emulsifying salt*), berfungsi menguraikan protein dalam keju sehingga menghambat pemisahan lemak
- f. Gas untuk kemasan (*packaging gas*), berfungsi mempertahankan mutu pangan dan melindungi pangan dari kerusakan

- g. Humektan (*humectant*), berfungsi mempertahankan kelembaban pangan
- h. Pelapis (*glazing agent*), berfungsi memberikan efek dan/atau tampilan mengkilap
- i. Pemanis (*sweetener*), termasuk pemanis alami (*natural sweetener*) dan pemanis buatan (*artificial sweetener*)
- j. Pembawa (*carrier*)
- k. Pembentuk gel (*gelling agent*), berfungsi membentuk gel
- l. Pembuih (*foaming agent*), berfungsi memelihara homogenitas dispersi fase gas dalam pangan bentuk cair atau padat
- m. Pengatur keasaman (*acidity regulator*), berfungsi mengasamkan, menetralkan dan/atau mempertahankan keasaman pangan
- n. Pengawet (*preservative*), berfungsi mencegah atau menghambat fermentasi, pengasaman, penguraian, dan perusakan yang disebabkan oleh mikroorganisme
- o. Pengembang (*raising agent*), berfungsi melepaskan gas sehingga menambah volume adonan
- p. Pengemulsi (*emulsifier*), membantu campuran yang homogen dari dua atau lebih fase seperti minyak dan air
- q. Pengental (*thickener*), berfungsi meningkatkan viskositas pangan
- r. Pengeras (*firming agent*), berfungsi memperkeras atau mempertahankan jaringan buah dan sayuran, atau berinteraksi dengan bahan pembentuk gel untuk memperkuat gel

- s. Penguat rasa (*flavour enhancer*), berfungsi memperkuat rasa dan/atau aroma tanpa menambahkan rasa dan/atau aroma baru
- t. Peningkat volume (*bulking agent*), berfungsi menambah volume pangan
- u. Penstabil (*stabilizer*), berfungsi menstabilkan sistem dispersi yang homogen pangan
- v. Peretensi warna (*colour retention agent*), berfungsi mempertahankan, menstabilkan atau memperkuat warna pangan tanpa menambah warna baru
- w. Perisa (*flavouring*), berfungsi memberi flavour kecuali rasa asin, manis dan asam
- x. Perlakuan tepung (*flour treatment agent*), berfungsi memperbaiki warna, mutu adonan dan/atau pemanggangan adonan, pemucat dan pematang tepung
- y. Pewarna (*colour*), termasuk pewarna alami (*natural food colour*) dan pewarna sintetis (*synthetic food colour*), berfungsi memberi atau memperbaiki warna
- z. Propelan (*propellant*), berfungsi mendorong pangan keluar dari kemasan
- aa. Sekuestran (*sequestrant*)

Bahan yang dilarang dipakai untuk bahan tambahan pangan:

- a. Asam borat dan senyawanya (*boric acid*)
- b. Asam salisilat dan garamnya (*salicylic acid and its salt*)
- c. Dietilpirokarbonat (*diethylpyrocarbonate, DEPC*)
- d. Dulsin (*dulcin*)
- e. Formalin (*formaldehyde*)
- f. Kalium bromat (*pottasium bromate*)
- g. Kalium klorat (*pottasium chlorate*)

- h. Kloramfenikol (*chloramphenicol*)
- i. Minyak nabati yang dibrominasi (*brominated vegetable oils*)
- j. Nitrofurazon (*nitrofurazone*)
- k. Dulkamara (*dulcamara*)
- l. Kokain (*cocaine*)
- m. Nitrobenzene (*nitrobenzene*)
- n. Sinamil antranilat (*cinnamyl anthranilate*)
- o. Dihidrosafrol (*dihydrosafrole*)
- p. Biji tonka (*tonka bean*)
- q. Minyak kalamus (*calamus oil*)
- r. Minyak tansi (*Tansy oil*)
- s. Minyak sasafras (*sasafras oil*)

10.2.2 Batas Maksimal Penggunaan Bahan Tambahan Pangan

Batas maksimal penambahan bahan tambahan pangan merupakan banyaknya bahan tambahan pangan yang diperbolehkan ada pada makanan dalam satuan yang ditetapkan yaitu mg/kg dan URT (Ukuran Rumah Tangga) (BPOM RI, 2012). Berikut adalah batas maksimal bahan tambahan pangan untuk masing-masing golongan:

- a. Pewarna alami

Tabel 10.1 Batas maksimal penambahan bahan tambahan pangan pewarna alami

No	Jenis Pewarna Alami	ADI
1	Kurkumin	0-3 mg/kg berat badan
2	Karmin dan ekstrak	• Karmin CI No.

No	Jenis Pewarna Alami	ADI
	cochineal CI No. 75470 (<i>Carmies and cochineal extract</i>)	75470 (<i>carmines</i>) : 0-5 mg/kg •Ekstrak cochineal CI No. 75470 (<i>cochineal extract</i>): Tidak dinyatakan (<i>No ADI allocated</i>)
3	Klorofil CI. No. 75810 (Chlorophyll)	Tidak dinyatakan (<i>No ADI allocated</i>)
4	Karamel I (Caramel I – plain)	tidak dinyatakan (<i>not specified</i>)
5	Karbon tanaman CI. 77266 (Vegetable carbon)	tidak dinyatakan (<i>no ADI allocated</i>)
6	Beta-karoten (sayuran) CI. No. 75130 (Carotenes, beta (vegetable))	tidak dinyatakan (<i>acceptable</i>)
7	Karotenoid (Carotenoids)	0-5 mg/kg berat badan
8	Merah bit (Beet red)	tidak dinyatakan (<i>not specified</i>)
9	Antosianin (Anthocyanins)	2,5 mg/kg berat badan

b. Pewarna Sintetis

No	Jenis Pewarna Alami	ADI
1	Tartrazin CI. No. 19140 (Tartrazine)	0 – 7,5 mg/kg berat badan
2	Merah allura CI. No. 16035	0 – 7 mg/kg berat

	(Allura red AC)	badan
3	Hijau FCF Cl. No. 42053 (Fast green FCF)	0 – 25 mg/kg berat badan

c. Pengawet

No	Jenis Pewarna Alami	ADI
1	Asam sorbat dan garamnya (Sorbic acid and its salts) • Asam sorbat (Sorbic acid) • Natrium sorbat (Sodium sorbate) • Kalium sorbat (Potassium sorbate) • Kalsium sorbat (Calcium sorbate)	0 – 25 mg/kg berat badan
2	Asam benzoat dan garamnya (Benzoic acid and its salts) • Asam benzoat (Benzoic acid) • Natrium benzoat (Sodium benzoate) • Kalium benzoat (Potassium benzoate) • Kalsium benzoat	0 – 5 mg/kg berat badan

No	Jenis Pewarna Alami	ADI
	(Calcium benzoate)	
3	Asam propionat dan garamnya (Propionic acid and its salts) : Asam propionat (Propionic acid), Natrium propionat (Sodium propionate), Kalsium propionat (Calcium propionate), Kalium propionat (Potassium propionate).	Tidak dinyatakan (<i>not limited</i>)

10.3 Toksikologi Bahan Tambahan Pangan

Toksikologi bahan tambahan pangan mempelajari dampak atau efek buruk dari zat tambahan pangan terhadap kesehatan manusia. Bahan tambahan pangan yang dimasukkan dalam makanan harus memenuhi syarat sesuai dengan peruntukannya dan batas yang ditentukan. Penggunaan bahan tambahan pangan yang tidak sesuai dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia bahkan menyebabkan kematian. Bahan tambahan yang sering digunakan pada produk makanan seperti penyedap, pemanis, pengawet dan pewarna. Bahan tersebut digunakan oleh produsen pangan secara berlebihan bahkan menggunakan bahan tambahan yang seharusnya dilarang sebagai bahan tambahan pangan.

10.3.1 Pemanis

Pemanis makanan terdiri dari dua jenis yaitu pemanis alami dan pemanis buatan. Pemanis alami ditemukan dalam bahan alam dengan proses sintetik atau fermentasi. Sedangkan pemanis buatan tidak ditemukan di alam dan prosesnya secara kimiawi. Pemanis buatan sering digunakan oleh produsen pangan sebagai pengganti gula, pemanis buatan yang ditambahkan pada pangan harus sesuai dengan ketentuan tidak boleh melebihi batas maksimal yang ditentukan. Pemanis buatan ini meliputi siklamat, sakarin, Aspartam, Asesulfam-K, Sukralosa, dan Neotam (Dinas Kesehatan Kabupaten Sukoharjo, 2013). Masing-masing pemanis buatan tersebut memiliki tingkat kemanisan yang berbeda.

Penambahan siklamat pada pangan dengan dosis yang melebihi batas dan terakumulasi pada tubuh dapat menyebabkan gangguan kesehatan seperti asma, sakit kepala, kehilangan daya ingat, bingung, insomnia, dan kanker otak. Jenis pemanis aspartame dapat meningkatkan kadar fenilalanin dalam darah (Standar Nasional Indonesia, 2004).

10.3.2 Pewarna

Pewarna makanan terdiri dari dua jenis yaitu pewarna alami dan pewarna sintetis. *Rhodamin B* merupakan salah satu dari jenis pewarna sintetis yang tidak diizinkan untuk ditambahkan dalam pangan. *Rhodamin B* pewarna yang sering digunakan dalam industri tekstil dan kertas, sebagai pewarna kain, kosmetik dan sabun (Adriani and Zarwinda, 2019). Akan tetapi saat ini penggunaan *rhodamin B* seringkali ditemukan pada makanan maupun minuman. Pewarna berbahaya ini

ditemukan pada kerupuk, terasi, cabai merah giling, agar-agar, manisan, sirup, dan minuman. Makanan atau minuman yang mengandung *rhodamin B* ini memiliki ciri warna merah cerah dan mencolok.

Rhodamin B yang terdapat pada produk pangan dan dikonsumsi manusia dapat menimbulkan efek pada kesehatan baik jangka pendek maupun jangka Panjang. Dampak yang ditimbulkan dari *rhodamin B* dapat menyebabkan keracunan dengan gejala terjadi iritasi saluran pernapasan, iritasi kulit, iritasi mata, dan saluran pencernaan. Dalam jangka yang Panjang dapat menyebabkan gangguan fungsi hati dan kanker (Wahyudi, 2017).

Selain *rhodamin B*, pewarna sintetis yang dilarang penggunaannya pada pangan tetapi banyak ditemukan dalam pangan tersebut adalah *Metanil Yellow*. *Metanil yellow* berwarna kuning kecoklatan, larut dalam air dan alkohol. Pewarna ini biasanya digunakan untuk pewarna tekstil, kertas, tinta, cat dan lain-lain. Ciri fisik pangan yang mengandung *metanil yellow* biasanya berwarna kuning mencolok dan berpendar serta terdapat titik warna atau warna tidak rata. Dalam pangan pewarna ini sering ditemukan pada kerupuk, mie, tahu, dan makanan yang berwarna kuning. Dampak yang terjadi bagi kesehatan manusia apabila mengonsumsi pangan yang mengandung *metanil yellow* dapat menyebabkan iritasi saluran cerna, mual, muntah, dan sakit.

10.3.3 Antikempal

Antikempal merupakan bahan tambahan pangan berbentuk serbuk yang bertujuan untuk mencegah penggumpalan pada pangan. Penggunaan antikempal pada produk pangan harus sesuai dengan batas maksimal yang dianjurkan. Antikempal yang dikonsumsi manusia akan berdampak pada kesehatan. Antikempal yang membahayakan bagi tubuh manusia salah satunya adalah ferrosianida. Ferrosianida mampu mengubah hemoglobin dalam sel darah merah dari ferro menjadi ferri sehingga hemoglobin tidak mampu mentranspor oksigen.

10.3.4 Pengawet

Bahan tambahan pengawet bertujuan untuk mengawetkan pangan agar tidak mudah rusak. Bahan tambahan pengawet yang tidak diizinkan pada pangan tetapi juga sering ditemukan pada pangan adalah formalin dan boraks. Formalin merupakan bahan kimia yang mudah larut dalam air, mudah terbakar, sangat reaktif dengan banyak zat (Mamun *et al.*, 2014). Formalin pada makanan sering ditemukan pada ikan asin, mie basah, tahu, bakso, udang dan lain-lain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa formalin ditemukan pada ikan asin yang dijual di pasar tradisional, dari 14 ikan asin yang diidentifikasi terdapat 4 ikan asin yang positif mengandung formalin (Wulandari, 2022).

Formalin ditambahkan dalam pangan dengan tujuan agar makanan tersebut awet. Formalin yang terdapat dalam makanan dan apabila dikonsumsi manusia dalam jangka waktu yang panjang dapat menyebabkan gangguan kesehatan pada

manusia. Gejala yang muncul apabila keracunan formalin meliputi sakit perut akut disertai muntah berulang, munculnya depresi susunan syaraf dan kegagalan peredaran darah. Secara akumulatif formalin dapat menyebabkan kerusakan hati, limpa, ginjal, pankreas dan bahkan kematian (Iftriani, Wahyuni and Amin, 2016).

Selain formalin, boraks juga sering ditemukan sebagai tambahan pangan. Boraks merupakan zat kimia yang tidak berbau dan didalam air berubah menjadi natrium hidroksida dan asam borat, dan tidak termasuk dalam bahan tambahan pangan. Penggunaan boraks sebagai bahan tambahan pangan bertujuan menjadikan makanan semakin renyah, menambah kekenyalan, memberikan tekstur padat, dan menambah rasa gurih. Boraks sering ditemukan pada bakso dan makanan yang terbuat dari pati atau terigu (Efrilia, Prayoga and Mekasari, 2016).

Boraks yang terdapat dalam makanan dan dikonsumsi oleh manusia dapat memberikan efek pada kesehatan. Manusia yang sering mengonsumsi makanan mengandung borak dapat menyebabkan iritasi saluran pencernaan, kerusakan ginjal bahkan dapat menyebabkan kematian apabila dosis mencapai 5-10 g/kg berat badan (Fitriyah, Wardana and Hayati, 2022). Apabila tubuh keracunan boraks dapat menimbulkan gejala seperti muntah, batuk, iritasi mata dan mulut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriani, A. and Zarwinda, I. 2019. Pendidikan Untuk Masyarakat Tentang Bahaya Pewarna Melalui Publikasi Hasil Analisis Kualitatif Pewarna Sintetis Dalam Saus. *Jurnal Serambi Ilmu*, 20(2), p. 217. doi: 10.32672/si.v20i2.1455.
- BPOM RI. 2012. *Pedoman Penggunaan Bahan Tambahan Pangan Pada Pangan Industri Rumah Tangga Dan Pangan Siap Saji Sebagai Pangan Jajanan Anak Sekolah*. Jakarta: Direktorat Standardisasi Produk Pangan, Deputi III, Badan POM RI.
- BPOM RI. 2019. Peraturan Badan Pengawas Obat Dan Makanan tentang No 11 Tahun 2019 Bahan Tambahan Pangan. *Badan pengawas obat dan makanan republik indonesia*, pp. 1–10.
- Chikmah, A. M. and Maulida, I. 2019. Identifikasi Bahan Tambahan Pangan yang Berbahaya (Rhodamin B dan Borak) pada Jajanan di Lingkungan Jl. Kartini Kecamatan Tegal Timur Kota Tegal. *Parapemikir: Jurnal Ilmiah Farmasi*, 8(2), pp. 1–4. Available at: <http://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/parapemikir/article/view/1466>.
- Dinas Kesehatan Kabupaten Sukoharjo. 2013. *Bahan Tambahan Pangan (BTP) Yang Diperbolehkan Dan Yang Berbahaya*. Available at: <https://dkk.sukoharjokab.go.id/read/bahan-tambahan-pangan-btp-yang-diperbolehkan-dan-yang-berbahaya> (Accessed: 22 January 2023)

- Efrilia, M., Prayoga, T. and Mekasari, N. 2016. Identifikasi Boraks Dalam Bakso Di Kelurahan Bahagia Bekasi Utara Jawa Barat Dengan Metode Analisa Kualitatif. *Jurnal Ilmiah Ibnu Sina*, 1(1 SE-), pp. 112–120. doi: 10.36387/jiis.v1i1.37.
- FAO/WHO. 2021. Definitions for the purposes of the Codex Alimentarius. p. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex>.
- Fitriyah, L. A., Wardana, H. K. and Hayati, N. 2022. Edukasi Identifikasi Boraks Dalam Makanan. 1(3), pp. 7–13.
- Iftriani, I., Wahyuni, S. and Amin, H. 2016. Analisis Kandungan Bahan Pengawet Formalin Pada Tahu Yang Diperdagangkan Dipasar Tradisional Kota Kendari (Pasar Panjang, Pasar Anduonohu, Pasar Basah Dan Pasar Baruga). *J. Sains dan Teknologi Pangan*, 1(2), pp. 125–130.
- Mamun, M. A. A. *et al.* 2014. Toxicological effect of formalin as food preservative on kidney and liver tissues in mice model. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(9), pp. 47–51. doi: 10.9790/2402-08924751.
- Nuraini, S. 2016. Analisis Kandungan Bahan Tambahan Dilarang Pada Pangan Jajanan Anak Sekolah (PJAS) di Sekolah Dasar Kecamatan Rajabasa Kota Bandar Lampung. *Jurnal Analisis Kesehatan*, 5(1), pp. 490–493.
- Republik Indonesia. 2012. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2012 Tentang Pangan. 10(9), p. 32.
- Standar Nasional Indonesia. 2004. Bahan Tambahan Pangan Pemanis Buatan - Persyaratan Penggunaan dalam Pangan. *Sni 01-6993-2004*, pp. 1–42.

- Wahyudi, J. 2017. Identifying Hazardous Materials for Food Additive: a Review. *Jurnal Litbang*, XIII(1), pp. 3–12.
- Wulandari, W. 2022. Gambaran Pengetahuan Pedagang Dalam Penggunaan Formalin Pada Ikan Asin Di Pasar Tradisional Kedungprahu. *PREPOTIF: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 6(2 SE-Articles), pp. 1341–1345.
doi: 10.31004/prepotif.v6i2.4090.

BAB 11

PAPARAN

Oleh Ilham Rahmatullah

11.1 Pendahuluan

Toksikologi merupakan salah satu bidang ilmu yang mempelajari efek berbahaya suatu bahan kimia yang penggunaannya tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia. Hal ini karena segala aktivitas manusia baik secara domestik maupun industri selalu berkaitan dengan penggunaan bahan kimia berbahaya. Terdapat banyak klasifikasi dari toksin/ racun itu sendiri diantaranya racun dapat diklasifikasikan berdasarkan: sumber, sifat kimiawi dan fisiknya, bagaimana dan kapan terbentuknya, efek terhadap kesehatan, kerusakan organ, dan hidup/tidaknya racun tersebut.

Klasifikasi berdasar sumber yaitu terdiri dari sumber alami dan buatan. Kemudian klasifikasi berdasarkan wujud yaitu terdiri atas cair, gas dan padat. Klasifikasi racun berdasarkan sifat fisika dan kimia yaitu dapat bersifat korosif, dapat bersifat radioaktif, dapat bersifat evaporative, dan dapat bersifat eksplosif serta reaktif. Sedangkan klasifikasi racun berdasarkan efek terhadap kesehatan:

- Fibrosis : terbentuknya jaringan ikat secara berlebihan
- Granuloma : didapatnya jaringan radang kronis

- Demam : suhu badan melebihi suhu normal
- Asfiksia : keadaan kekurangan oksigen
- Alergi : sensitifitas yang berlebihan
- Kanker : tumor ganas
- Mutan : generasi yang berbeda dg gen induknya
- Teratogenik : cacat bawaan
- Keracunan sistemik : keracunan yang menyerang seluruh tubuh.

Sedangkan klasifikasi atas dasar terbentuknya pencemar yaitu pencemar yang terbentuk dan keluar dari sumber disebut pencemar primer dan pencemar yang sudah bereaksi dilingkungan disebut pencemar sekunder, serta pencemar sekunder yang bereaksi menjadi pencemar tersier. Dalam toksikologi tentunya kita akan mempelajari tentang paparan. Berikut akan dijelaskan terkait karakteristik paparan pada toksikologi.

11.2 Karakteristik Paparan

Paparan adalah pengalaman yang didapat populasi atau organisme akibat terkena atau terjadinya kontak dengan suatu faktor agent potensial yang berasal dari lingkungan. Pengukuran paparan dapat dilakukan secara kualitatif maupun dengan kuantitatif. Paparan juga dapat dikatakan yaitu akibat yang ditimbulkan oleh adanya kontak antara toksikan dengan manusia. Sedangkan pajanan adalah sebagai kontak antara toksikan dan manusia. Kontak tersebut dapat terjadi melalui inhalasi, kulit, ingesti, ataupun injeksi (intentional poisoning).



Gambar 11.1. Penggunaan APD untuk mencegah terjadinya paparan. (Sumber: linisehat.com)

Adapun jalur paparan utama pada manusia dapat melalui:

- a. Saluran pernafasan (Inhalasi)
Penting dalam paparan lingkungan dan tempat kerja terhadap kontaminan udara.
- b. Saluran pencernaan (ingesti)
Penting dalam paparan lingkungan dari kontaminan makanan dan air serta jalur utama masuknya obat-obatan.
- c. Kulit (dermal)
Penting dalam paparan lingkungan dan tempat kerja. Banyak obat- obatan dan produk konsumen digunakan langsung terhadap kulit.

Bahaya yang dihasilkan dari bahan kimia tersebut tidak hanya berasal dari racunnya saja, tetapi juga dari bahaya potensial yang berasal dari karakteristik paparannya. Oleh karena itu, pentingnya mengetahui karakteristik tentang bahaya potensial dan toksisitas dari suatu bahan kimia. Tentunya faktor utama yang mempengaruhi toksisitas yang berhubungan dengan situasi paparan yaitu: Jalur masuk kedalam tubuh dan tempat paparannya, Jangka waktu dan Frekuensi paparan

Berikut penjelasan masing-masingnya:

- a. Jalur masuk ke dalam tubuh dan tempat paparannya. Seperti yang dijelaskan diatas tadi bahwa jalur utama masuknya racun dalam tubuh dapat berasal dari:

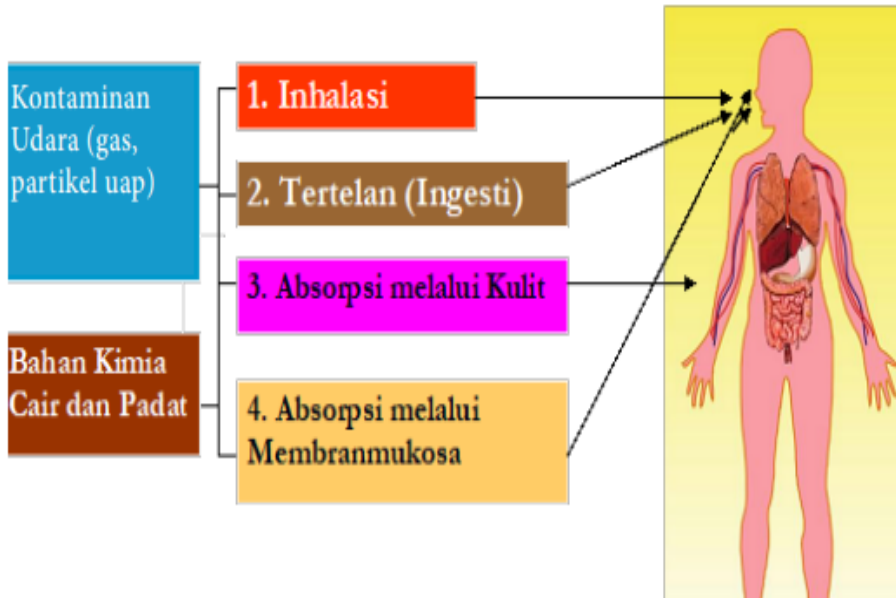
- Saluran Pernafasan / inhalasi

Inhalasi pada umumnya merupakan jalur pajanan bagi toksikan yang berwujud debu/partikel, gas, asap, atau uap. Tingkat penyerapan toksikan melalui jalur inhalasi tersebut bergantung pada berbagai faktor, di antaranya atmosfer toksikan serta kemampuan toksikan untuk melintasi membran sel.

- Kulit

Kontak kulit menjadi jalur pajanan toksikan yang berwujud cair dengan kemampuan menguap (volatilitas) rendah. Selain itu, dapat juga menjadi jalur masuk toksikan zat padat. Berbagai bahan toksik dapat melewati pelindung atau penghalang kulit (skin barrier), diserap oleh sistem sirkulasi,

dan disebarkan ke seluruh organ internal, hingga menimbulkan gangguan.



Gambar 11.2 Jalur masuk paparan ke dalam tubuh dan tempat pemaparannya (**Sumber: Lestari, 2009**)

- Saluran pencernaan/ gastro intestinal (dengan menelan atau ingesti)

Toksikan dapat masuk ke dalam mulut dan tertelan. Apabila tertelan, toksikan tentu melewati saluran cerna. Sebagian toksikan dapat diekskresikan melalui feses, namun sebagian lainnya dapat diserap oleh saluran cerna, masuk ke dalam darah dan memberi efek sistemik dalam tubuh.

- Dan jalur parenteral lainnya, contohnya melalui injeksi yaitu Paparan toksikan dapat masuk ke tubuh melalui luka atau penetrasi kulit. Melalui pembuluh darah, toksikan dapat menyebar ke seluruh tubuh.

Umumnya jalur paparan yang bersumber dari lingkungan atau katakanlah industri biasanya masuk melalui saluran pernafasan atau dengan cara terhirup, dan juga dapat melalui kulit, bahkan juga dapat melalui saluran pencernaan misalnya tertelan. Dan kebanyakan kasus yang menyebabkan keracunan biasanya jalur nya melalui saluran pencernaan atau bahan kimia secara tidak sengaja tertelan oleh pekerja.

b. Jangka waktu dan frekuensi paparan

Frekuensi merupakan interval waktu atau seberapa sering seorang terpapar toksin atau racun tersebut. Misalnya seorang pekerja diindustri, dapat dilihat seberapa sering pekerja tersebut terpapar suatu toksikan di tempat kerja industrinya. Frekuensi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu sekali atau berulang. Dan Frekuensi paparan dapat dikategorikan menjadi paparan tunggal (*single exposure*) dan paparan berulang (*repeated exposure*).



Gambar 11.3. Industri (Sumber: mesin.pnj.ac.id)

Sedangkan durasi pajanan adalah lama waktu seorang pekerja terpajan suatu toksikan. Durasi pajanan ini berhubungan erat dengan efek toksik yang akan dialami oleh pekerja. Durasi pajanan merupakan faktor yang penting dan menentukan dampak kesehatan dari suatu toksikan. Untuk pajanan pada manusia, pada umumnya durasi dikategorikan menjadi akut (pajanan sesaat dan terjadi hanya pada satu waktu saja), subkronik (rentang waktu minggu atau bulan), dan kronik (beberapa bulan atau tahun). Secara ringkas, terjadinya pemaparan berulang dibagi menjadi tiga katagori : subakut, subkronis dan kronis. Pemaparan subakut adalah pemaparan berulang terhadap suatu bahan kimia untuk jangka waktu satu bulan atau kurang. Pemaparan subkronik adalah pemaparan berulang suatu bahan kimia untuk jangka waktu satu sampai tiga bulan. Sedangkan pemaparan kronis adalah

pemaparan suatu bahan kimia untuk jangka waktu lebih dari tiga bulan.

Durasi tersebut dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu:

- *Single exposure* (paparan tunggal), yaitu kurang dari 24 jam paparan menimbulkan efek toksik yang bersifat akut
- *Repeated exposure* (paparan berulang), yang dibedakan atas beberapa jenis, yaitu
 - a. paparan berulang kurang dari 1 bulan, yang menimbulkan efek toksik yang bersifat subakut
 - b. paparan berulang 1–3 bulan, yang menimbulkan efek toksik yang bersifat subkronik
 - c. paparan berulang lebih dari 3 bulan, yang menimbulkan efek toksik yang bersifat kronik.

Paparan akut umumnya merupakan paparan tunggal, sedangkan paparan subkronis dan kronis umumnya merupakan paparan berulang. Seperti halnya durasi, frekuensi paparan pun dapat memengaruhi efek toksik dari suatu toksikan.

11.3 Aliran Toksikan dalam Lingkungan

Sebelum toksikan sampai pada tubuh manusia tentunya perlu kita mempelajari bagaimana aliran toksikan tersebut dalam lingkungan. Toksikan atau racun atau bahan kimia tersebut berasal dari berbagai kegiatan yang dilakukan oleh manusia. Misalnya kegiatan industri. Sebagian bahan toksik dengan pola emisi akan masuk ke dalam lingkungan baik

melalui udara, air maupun tanah. Toksikan tersebut dapat masuk ke troposphere dan terus ke stratosphere. Selain itu toksikan juga dapat masuk ke dalam tanah, ke air bawah tanah, samudra dan terbenam di dalamnya. Bahan toksikan yang sudah berada dalam air tanah akan masuk ke dalam tanaman dan masuk ke stratosphere dan akhirnya sampai pada manusia dan makhluk hidup lainnya.

Jadi Perjalanan bahan kimia tersebut tentunya melalui proses yang panjang dan melalui komponen lingkungan seperti air, udara, tanah dan lainnya. Contohnya, toksikan yang dihasilkan dari pencemaran udara industri, yang mana industri tersebut menghasilkan Pb misalnya. Kemudian, Pb ini terbawa oleh angin hingga sampai ke pemukiman warga, dan warga pun menghirup udara yang tercemar Pb.

Pun juga bisa melalui tanah, yang mana Pb tadi apabila berada di udara dan terkena hujan, maka akan jatuh bersama air hujan dan kemudian mencemari permukaan air dan tanah. Apabila masyarakat menggunakan air tanah sebagai sumber air minumnya, maka Pb tersebut dapat tertelan oleh masyarakat atau jalur masuknya Pb melalui ingesti sehingga dapat berdampak bagi kesehatan masyarakat tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Berniyati, Titiek. 2018. Biomarker Toksisitas Paparan Logam Tingkat Molekuler. Surabaya: Airlangga University Press.
- Pengantar Toksikologi diakses dari :
https://ocw.ui.ac.id/pluginfile.php/9705/mod_resource/content/1/KBB%20Sesi%207%20-%20Pengantar%20Toxikologi-r01.pdf
- Kurniawidjaja, L. M. 2009. Bahan Kuliah Toksikologi Industri. FKM-UI.
- Yulianto, dan Nurul Amaloyah. 2017. Bahan Ajar Kesehatan Lingkungan Toksikologi Lingkungan. Jakarta: BPPSDM Kemenkes RI.

BIODATA PENULIS



Dwi Astuti, S.Pd., SKM., M.Kes.

Dosen Program Studi Kesehatan Masyarakat
Fakultas Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas
Muhammadiyah Surakarta

Penulis lahir di Cilacap pada tanggal 13 Juni 1975. Pendidikan yang ditempuh dimulai dari SD Mujur VI tahun 1980, dilanjutkan ke SMPN 1 Kroya pada tahun 1990 dan SMAN 1 Purwokerto pada tahun 1993. Menamatkan D3 Kesehatan Lingkungan di AKL Depkes Purwokerto pada tahun 1996, S1 Pendidikan Biologi (tahun 2002) dan S1 Kesehatan Masyarakat (tahun 2011) di Universitas Muhammadiyah Surakarta, S-2 Magister Kesehatan Minat Utama Kesehatan Lingkungan di Universitas Gadjah Mada Tahun 2007. Saat ini penulis tengah menempuh Program Doktorat di Universiti Kebangsaan Malaysia.

Penulis merupakan dosen di Program Studi Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Muhammadiyah Surakarta sejak tahun 1997- sekarang. Kaya ilmiah yang dihasilkan lebih banyak berkulat di Bidang Kesehatan Lingkungan. Moto penulis yaitu “Jadilah manusia yang selalu memberi manfaat untuk manusia lain”.

BIODATA PENULIS



Arina Nuraliza Romas, SKM., MPH.

Dosen Jurusan Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Penulis lahir di Kebumen tanggal 19 Agustus 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Sarjana Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di Politeknik Rukun Abdi Luhur Kudus. Menyelesaikan pendidikan S1 Kesehatan Masyarakat di STIKes Surya Global Yogyakarta pada tahun 2017 dan melanjutkan S2 Ilmu Kesehatan Masyarakat peminatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di FKMK Universitas Gadjah Mada.

BIODATA PENULIS



Karina Mutia Safera, SKM, MPH

Penulis lahir di Demak tanggal 8 Maret 1998. Penulis telah menyelesaikan pendidikan S1 pada Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Diponegoro pada tahun 2019 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kesehatan Masyarakat Universitas Gadjah Mada dan telah lulus pada tahun 2022. Penulis pernah bekerja sebagai enumerator di CV. Enviro Dila Consultant untuk mendata pelaporan B3 dari industri yang ada di Kawasan Industri Wijaya Kusuma. Penulis juga pernah bekerja sebagai Asisten Peneliti untuk meneliti dampak kesehatan di Pulau Obi, Halmahera Selatan, Maluku Utara.

BIODATA PENULIS



apt. Muh Taufiqurrahman, M.Farm

Dosen di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) Dirgahayu
Kota Samarinda

Penulis adalah putra ke dua dari tiga bersaudara dari pasangan Ibrahim, BA dan Asiah S.Pd. Lahir 22 Agustus 1993 di Bima, Provinsi Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Penggiat literasi ini telah menamatkan pendidikan SDN 55 Kota Bima, MTS Negeri 1 Kota Bima, dan SMA Negeri 4 Kota Bima. Ia saat ini tinggal di Kota Samarinda, Provinsi Kalimantan Timur bersama istri. Setelah lulus Program Magister Farmasi Universitas Pancasila, terhitung Agustus 2022, ia diamanahkan menjadi Dosen di Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) Dirgahayu, Kota Samarinda.

BIODATA PENULIS



Ayusti Dirga, S.Si., M.Sc.

Dosen Fakultas Teknologi Kesehatan
Universitas Megarezky

Penulis lahir di Watampone tanggal 17 Agustus 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Diploma IV Teknologi Laboratorium Medis Fakultas Teknologi Kesehatan Universitas Megarezky. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia di Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang Toksikologi dan saat ini aktif dalam mengajar dan membimbing mahasiswa dalam pengajaran dan penelitian.

BIODATA PENULIS



Dr. Rahmawati, S. Si, M. Kes.

Dosen Tetap Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis
(TLM) POLITEKNIK KESEHATAN MUHAMMADIYAH
MAKASSAR

Penulis lahir di Desa Kasiwang Kecamatan Suli Kabupaten Luwu pada tanggal 12 April 1980, merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Abd. Muis dan Rapidah Hasan. Penulis adalah dosen tetap yayasan pada Program Studi D3 Teknologi Laboratorium Medis (TLM) Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar. Menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 20 Cimpu Kecamatan Suli Kabupaten Luwu pada tahun 1992. Pada tahun 1995 telah menyelesaikan pendidikan sekolah menengah pertama pada SMP Negeri 2 Kabupaten Takalar. Kemudian pada tahun 1998 menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas pada Sekolah Menengah Farmasi (SMF) Depkes Ujungpandang, Makassar.

Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin pada tahun 2003. Pada tahun 2004 melanjutkan S2 pada Jurusan Kesehatan

Lingkungan Fakultas Kesehatan Masyarakat (FKM) Universitas Hasanuddin dan berhasil menyelesaikan studi pada tahun 2006. Kemudian pada tahun 2013 melanjutkan S3 pada jurusan Ilmu Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin dan berhasil meraih gelar Doktor pada tahun 2018. Penulis menekuni bidang ilmu kimia analitik dan biokimia serta toksikologi klinik.

BIODATA PENULIS



Ir. Darsini, ST, M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik Universitas Veteran Bangun Nusantara
Sukoharjo

Penulis lahir di Boyolali tanggal 08 Desember 1973. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik, Universitas Veteran Bangun Nusantara Sukoharjo. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Industri dan melanjutkan S2 pada Ilmu Lingkungan. Penulis menekuni bidang:

1. Teknik Industri dalam hal optimasi.
2. Sistem Lingkungan Industri
3. Perancangan Model Optimasi dalam pengolahan limbah cair.

BIODATA PENULIS



**Dodi Satriawan, S.T., M.Eng., CPHCEP., CPMP., CPRW.,
CBOA., CNPHRP., CLMA.**

**Staf Dosen Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan,
Politeknik Negeri Cilacap**

Penulis lahir di Bengkulu tanggal 07 Mei 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi D-IV Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia, Magister Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang bioproses, bioenergi, dan pengolahan air limbah.

BIODATA PENULIS



Windi Wulandari, S.KM, M.P.H
Dosen Kesehatan Masyarakat UMS

Penulis lahir di Boyolali tanggal 26 Oktober 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kesehatan Masyarakat Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Surakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kesehatan Masyarakat di Universitas Negeri Semarang (Unnes) tamat pada tahun 2011 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kesehatan Masyarakat Peminatan Kesehatan Lingkungan di Universitas Gadjah Mada (UGM) tamat pada tahun 2014. Pengalaman menulis buku, penulis telah menulis sebuah buku ajar dengan judul Konsep Dasar Kesehatan Lingkungan, buku lainnya dengan judul Higiene, Sanitasi dan Keselamatan Kesehatan Kerja (K3) dan Kesehatan Lingkungan Pemukiman dan Perkotaan. Penulis menekuni bidang kesehatan lingkungan.

BIODATA PENULIS



Ilham Rahmatullah, SKM., M.Ling.

Dosen pengajar di Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Widya Gama Mahakam Samarinda

Penulis merupakan dosen pengajar di Fakultas Kesehatan Masyarakat di Universitas Widya Gama Mahakam Samarinda. Penulis lahir di Tinco, 22 September 1989. Pada tahun 2011, penulis menyelesaikan pendidikan S1 di FKM Universitas Widya Gama Mahakam Samarinda dan pada tahun 2019, penulis menyelesaikan Magister Lingkungan di Program Pascasarjana Ilmu Lingkungan di Universitas Mulawarman.

Selama berproses di dunia pendidikan, penulis juga aktif di Organisasi Perhimpunan Sarjana dan Profesional Kesehatan Masyarakat Indonesia (PERSAKMI) Prov. Kaltim dan juga Ikatan Ahli Kesehatan Masyarakat Indonesia (IAKMI) Prov. Kaltim, disamping itu penulis juga aktif menuliskan artikel ilmiah dibidang kesehatan masyarakat.