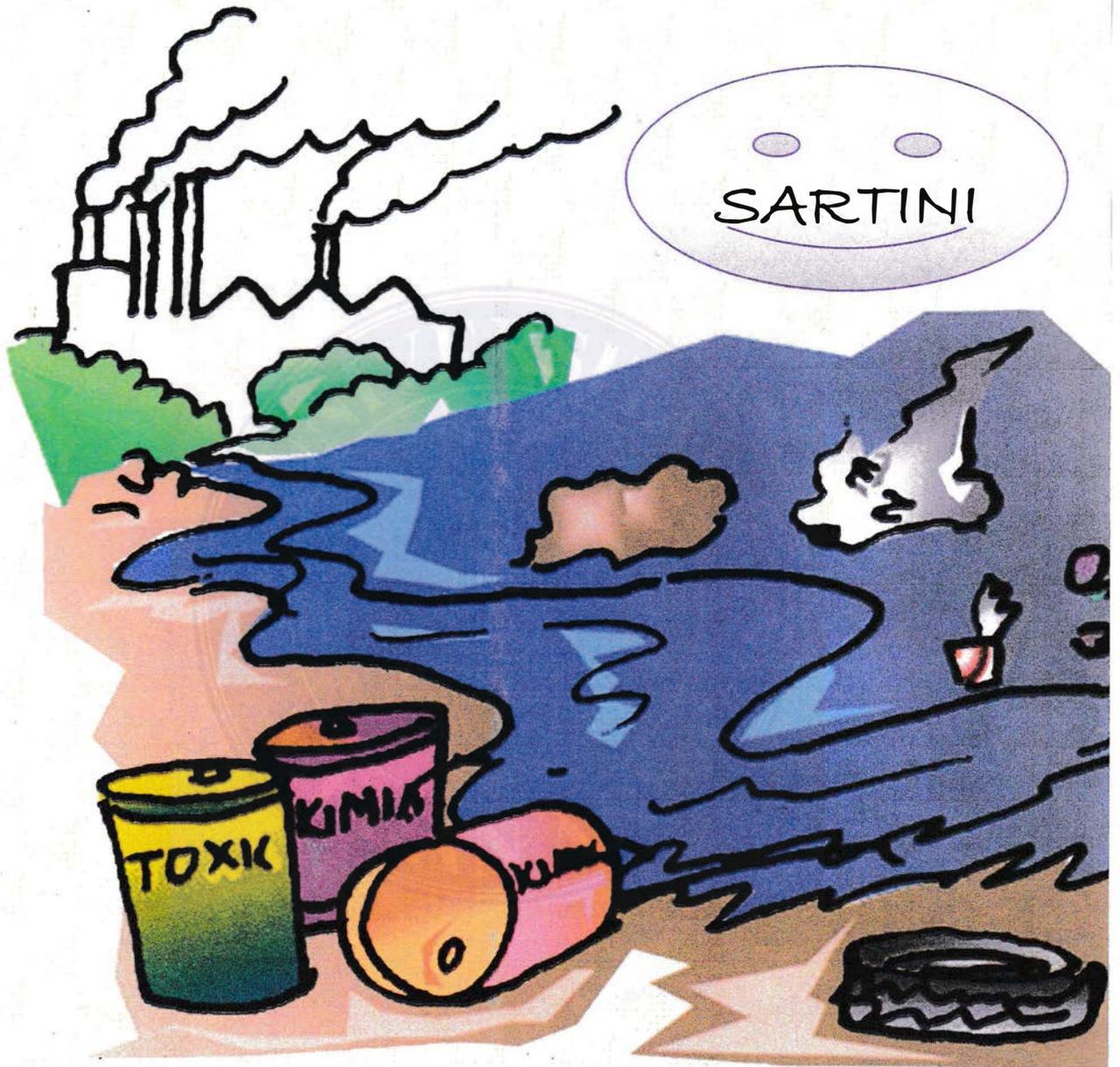


# PENCEMARAN LINGKUNGAN

(DIKTAT KULIAH)



FAKULTAS BIOLOGI  
UNIVERSITAS MEDAN AREA

## DAFTAR ISI

|   |    |
|---|----|
| DAFTAR ISI.....                                       | i  |
| BAB I. AIR .....                                      | 1  |
| 1.1. Keradaan Air .....                               | 2  |
| 1.2. Peranan Air bagi mahluk Hidup .....              | 2  |
| 1.3. Peranan Air Secara Umum .....                    | 3  |
| 1.4. Penggolongan Air .....                           | 3  |
| BAB II. PENCEMARAN AIR .....                          | 5  |
| 2.1. Sumber Pencemar Air .....                        | 6  |
| 2.2. Parameter Fisik .....                            | 7  |
| 2.3. Parameter Kimiawi .....                          | 10 |
| 2.4. Parameter Biologik .....                         | 12 |
| BAB III. EFEK POLUTAN .....                           | 14 |
| 3.1. Efek Polutan Secara Fisik .....                  | 14 |
| 3.2. Efek Oksidatif .....                             | 14 |
| 3.3. Efek Polutan Secara Khemis .....                 | 14 |
| 3.3.1. Efek Polutan Nutrien Secara Khemis .....       | 15 |
| 3.3.2. Efek Polutan Mikroorganisme.....               | 15 |
| 3.3.3. Efek Polutan Radio Nukleotida .....            | 16 |
| IV. INDIKATOR PENCEMARAN PERAIRAN .....               | 17 |
| 4.1. Ikan dan Avertebrata sebagai Bioindikator .....  | 17 |
| 4.2. Mikroorganisme sebagai Bioindikator .....        | 20 |
| 4.3. Ganggang dan Tumbuhan sebagai Bioindikator ..... | 25 |
| BAB V. TOKSISITAS PENCEMARAN AIR .....                | 25 |
| 5.1. Faktor yang Mempengaruhi Efek Toksisitas.....    | 31 |
| 5.2. Faktor Intrinsik .....                           | 31 |
| 5.3. Faktor Ekstrinsik .....                          | 35 |
| 5.4. Jenis Interaksi .....                            | 35 |
| BAB VI. PRINSIP BIOASSAY .....                        | 37 |
| 6.1. Kriteria Dasar Bioasay .....                     | 37 |
| 6.2. Terminologi Toksisitas/Bioassay .....            | 38 |
| 6.3. Parameter Efek Subletal .....                    | 42 |

|  |    |
|--|----|
| BAB VII. BIODEGRADASI.....                               | 43 |
| BAB VIII. TANAH .....                                    | 52 |
| 8.1. Tekstur Tanah, Porositas dan pH Tanah .....         | 55 |
| BAB IX. EROSI TANAH .....                                | 57 |
| BAB X. LIMBAH DAN PENCEMARAN TANAH .....                 | 63 |
| 10.1. Jumlah dan Macam Limbah .....                      | 63 |
| 10.2. Pembuangan Limbah Secara Umum .....                | 65 |
| BAB. XI. Pencemaran Tanah oleh Aktivitas Pertanian ..... | 69 |
| 11.1. Penggunaan Pupuk .....                             | 69 |
| BAB XII. PENCEMARAN OLEH INDUSTRI .....                  | 72 |
| 12.1. Klasifikasi Industri .....                         | 73 |
| BAB. XIII. SAMPAH PLASTIK .....                          | 79 |
| 13.1. Pengolahan Sampah Plastik .....                    | 80 |
| BAB XIV. PENCEMARAN UDARA .....                          | 82 |
| 14.1. Komponen Pencemaran Udara.....                     | 85 |
| 14.2. Dampak Negatif Pencemaran Udara.....               | 88 |
| 14.3. Efek Pencemaran Udara Terhadap Biosfer .....       | 89 |

## **BAB I. A I R**

### **1.1. Keberadaan Air di Alam**

Hampir 70 % isi bumi ini adalah air, sehingga diperkirakan tiap sentimeter persegi permukaan bumi ini rata-rata mengandung air sebanyak 273 liter, yang terdiri dari 269 liter air tawar dan sisanya air laut. Air tawar tersebar di permukaan bumi dalam bentuk danau, sungai, air tanah (sumur, akuifer), dan air permukaan (run-off) lainnya. Air tawar dibedakan dengan air laut berdasar kandungan kimianya. Air tawar mengandung  $\text{CaCO}_3$ , sedangkan air laut mengandung  $\text{NaCl}$  dan sedikit  $\text{MgCl}_2$  sehingga berasa asin dan sedikit pahit. Air dapat berbentuk padat (es atau salju), cair, atau gas (uap).

Air tawar yang masuk ke dalam siklus penguapan dan hujan diperkirakan mencapai  $37.000 \text{ km}^3$  per tahun. Pada saat yang bersamaan,  $10.000 \text{ km}^3$  digunakan oleh manusia per tahunnya. Tahun 2000 diperkirakan penggunaan akan meningkat hingga mencapai  $18.700 \text{ km}^3$  per tahun. Selama 25 tahun terakhir ini, penggunaan air tawar siap pakai telah mencapai 50 % dari total air tawar atau 5% dari jumlah total air di bumi telah dimanfaatkan oleh manusia.

Air yang telah digunakan dan dibuang sebenarnya tidak mengurangi jumlah air di bumi secara keseluruhan, namun air tersebut sebagian tidak layak dipakai lagi karena mengalami pencemaran. Air tercemar sebenarnya masih mungkin dibersihkan secara alamiah melalui siklus hidrologi, yakni dengan cara filtrasi melalui pori-pori tanah. Hanya saja kemampuan self purification alam ini tidak bisa cepat sehingga tidak dapat lagi mengimbangi kecepatan peningkatan jumlah air tercemar yang terbentuk.

Air tanah merupakan sumber utama pemasok air. Jumlah kandungan air tanah sangat tergantung pada susunan tanah, batuan dasar, dan banyaknya air permukaan yang dapat diserap. Kualitas air tanah pada umumnya cukup baik dan dapat digunakan sebagai air minum. Oleh karena itu, air tanah merupakan satu-satunya alternatif terbaik untuk digunakan apabila air permukaan telah mengalami pencemaran.

## **1.2. Peranan Air Bagi Makhluk Hidup**

Kehidupan di permukaan bumi tidak dapat dipisahkan dari air. Air dalam hal ini punya peranan pokok bagi makhluk hidup, yakni mulai dari metabolisme sel, pertukaran ion, osmosis, transportasi dan sirkulasi materi dalam tubuh, medium dan katalisator berbagai proses fisiologis tubuh, hingga sebagai substansi dasar sel.

Tubuh manusia dewasa mengandung air sebesar 65 – 75 % berat tubuh. Jika manusia kehilangan cairan tubuh sebesar 10 % akan dapat mengalami dehidrasi, dan manusia dapat mengalami kematian jika kehilangan lebih dari 20 % cairan tubuh. Jumlah air yang masuk ke tubuh manusia harus seimbang dengan jumlah cairan yang dikeluarkan, baik dalam bentuk keringat, penguapan/pernafasan, pengeluaran urin dan faeces, atau pada saat kehilangan cairan darah. Oleh karena itu, tiap orang disarankan menambah air bagi tubuhnya sebanyak 2,8 – 13 liter per hari. (tergantung suhu dan cuaca lingkungan). Jika tubuh sama sekali tidak mendapat kan suplai air, maka diperkirakan tubuh hanya akan bertahan hidup selama 10 hari saja. Kandungan air pada tanaman atau hewan (terlebih mikroorganisme) dapat mencapai sebesar 90 %.

Banyaknya material yang terlarut dalam air menjadikan air kaya akan nutrien, energi, dan bahan esensial pendukung hidup. Oleh karena itu, wajar jika kehidupan yang ada di air jauh lebih banyak dan bervariasi bila dibandingkan dengan kehidupan di darat.

## **1.3. Peranan Air Secara Umum**

Kebutuhan akan air baik bagi manusia maupun bagi industri saat ini dirasakan semakin meningkat. Peranan air secara umum dapat dibedakan menjadi 5 katagori, yaitu :

1. *Air untuk keperluan penduduk.* Air ini dipergunakan untuk keperluan sehari-hari misalnya mencuci, memasak, menyiram tanaman, keperluan komersial dalam skala home industri. Air jenis ini biasanya disediakan dan dikelola langsung oleh perusahaan jasa air minum (PAM).
2. *Air untuk keperluan industri.* Penyediaan air ini dapat dilakukan oleh PAM atau langsung diambil dari air tanah atau air permukaan. Kualitas air yang diperlukan sangat bervariasi, tergantung pada jenis industri, perlengkapan industri, proses yang dipakai, jumlah tenaga kerja, dsb. Apabila air yang tersedia kualitasnya kurang memenuhi syarat untuk prosesing di dalam pabrik, maka air harus diolah di instalasi

pengolahan dan penjernihan air terlebih dahulu. Air jenis ini biasanya digunakan untuk pendingin, penguapan, produksi barang atau menampung limbah.

3. *Air untuk pendingin.* Sumbernya berasal dari sungai, estuari atau danau. Air ini diperlukan dalam jumlah besar dan dipakai untuk pendingin pada pusat pembangkit listrik tenaga air.
4. *Air untuk keperluan agroindustri,* yaitu untuk irigasi, sanitasi ternak, atau pencucian hasil pasca panen.
5. *Air untuk keindahan dan rekreasi.* Sumber yang dijadikan obyek dapat berupa danau, sungai, kanal, estuari, waduk, atau pantai.

#### **1.4. Penggolongan Air**

Standar kualitas air untuk keperluan masyarakat dan industri sangat berbeda. Departemen kesehatan RI membuat klasifikasi air menjadi 3 kelas, yakni :

1. *Badan air kelas A,* yaitu badan air yang airnya dapat digunakan untuk air baku atau air minum.
2. *Badan air kelas B,* adalah badan air yang airnya digunakan untuk pemandian alam dan pertanian yang hasilnya dapat dimakan tanpa dimasak terlebih dahulu.
3. *Badan air kelas C,* adalah badan air yang airnya dipergunakan untuk perikanan darat, olah raga, pesiar, dan keindahan.

Diantara berbagai macam bentuk badan air yang digunakan oleh manusia, sungai merupakan badan air yang paling banyak dimanfaatkan. Hal ini disebabkan sungai merupakan sumber air yang dapat terdistribusi secara luas. Selain itu, sungai merupakan sumber air bagi segala macam kebutuhan makhluk hidup, tempat rekreasi, dan sekaligus merupakan tempat “ideal” untuk membuang berbagai macam limbah. Mengingat pentingnya fungsi sungai, maka keseimbangan ekosistemnya harus selalu dijaga agar siklus-siklus alami dapat terus dipertahankan dan jaring-jaring makanan yang tersedia tidak menjadi rusak.

Berdasarkan jumlah buangan yang masuk, kandungan O<sub>2</sub>, BOD, dan kondisi biologik lainnya, sungai diklasifikasikan menjadi 4 kelas, yaitu :

1. *Sungai kelas I.* Sungai dan saluran airnya tidak tercemar, yakni bila memiliki kadar BOD kurang dari 3 ppm. Air sungai semacam ini jelas masih sesuai untuk suplai air langsung bagi masyarakat.
2. *Sungai kelas II.* Sungai dan saluran airnya dalam kondisi yang meragukan, perlu peningkatan kualitas, dan biasanya sungai ini sudah bercampur dengan air buangan baik yang berbahaya maupun yang kurang berbahaya. Air sungai ini masih memungkinkan untuk dipergunakan oleh industri maupun masyarakat.
3. *Sungai kelas III.* Sungai dan saluran-saluiran airnya dalam kondisi yang memprihatinkan, mutunya perlu segera diperbaiki. DO sungai umumnya telah mencapai 50% dibawah ambang batas air normal. Air sungai ini sesuai untuk irigasi, atau untuk pendingin mesin di berbagai industri.
4. *Sungai kelas IV.* Sungai beserta saluran-salurannya telah mengalami pencemaran berkatagori berat, tidak memiliki lagi daya dukung terhadap biota air khususnya ikan, sangat berbau, dan kandungan BOD-nya lebih dari 12 ppm. Air sungai semacam ini jelas tidak layak untuk tujuan apapun.

Air murni atau alami yang baik harus memenuhi beberapa kriteria dasar sebagai berikut :

1. *Secara fisik*, suhunya tidak melebihi ambang batas yang telah ditentukan sesuai standar di tiap daerah. Tidak mengandung padatan terlarut, tidak berwarna, tidak berbusa, tidak berbau, dan tidak berasa.
2. *Secara khemis*, cukup mengandung oksigen, ada keseimbangan unsur-unsur kimia yang penting untuk pendukung kehidupan, tidak mengandung bahan organik berlebihan, dan tidak mengandung substansi toksik.
3. *Secara biologis*, mengandung mikroorganisme tertentu dalam jumlah terbatas, memiliki biota air yang berada dalam keseimbangan ekologis.

Danau, sungai, dan badan-badan air yang ada di bumi umumnya memiliki ekosistem tersendiri. Apabila ekosistem tersebut mengalami perubahan oleh faktor luar (eksogen) atau faktor dalam (endogen), maka ekosistem perairan tersebut sudah digolongkan kedalam keadaan tercemar.

1. *Sungai kelas I.* Sungai dan saluran airnya tidak tercemar, yakni bila memiliki kadar BOD kurang dari 3 ppm. Air sungai semacam ini jelas masih sesuai untuk suplai air langsung bagi masyarakat.
2. *Sungai kelas II.* Sungai dan saluran airnya dalam kondisi yang meragukan, perlu peningkatan kualitas, dan biasanya sungai ini sudah bercampur dengan air buangan baik yang berbahaya maupun yang kurang berbahaya. Air sungai ini masih memungkinkan untuk dipergunakan oleh industri maupun masyarakat.
3. *Sungai kelas III.* Sungai dan saluran-saluiran airnya dalam kondisi yang memprihatinkan, mutunya perlu segera diperbaiki. DO sungai umumnya telah mencapai 50% dibawah ambang batas air normal. Air sungai ini sesuai untuk irigasi, atau untuk pendingin mesin di berbagai industri.
4. *Sungai kelas IV.* Sungai beserta saluran-salurannya telah mengalami pencemaran berkatagori berat, tidak memiliki lagi daya dukung terhadap biota air khususnya ikan, sangat berbau, dan kandungan BOD-nya lebih dari 12 ppm. Air sungai semacam ini jelas tidak layak untuk tujuan apapun.

Air murni atau alami yang baik harus memenuhi beberapa kriteria dasar sebagai berikut :

1. *Secara fisik*, suhunya tidak melebihi ambang batas yang telah ditentukan sesuai standar di tiap daerah. Tidak mengandung padatan terlarut, tidak berwarna, tidak berbusa, tidak berbau, dan tidak berasa.
2. *Secara khemis*, cukup mengandung oksigen, ada keseimbangan unsur-unsur kimia yang penting untuk pendukung kehidupan, tidak mengandung bahan organik berlebihan, dan tidak mengandung substansi toksik.
3. *Secara biologis*, mengandung mikroorganisme tertentu dalam jumlah terbatas, memiliki biota air yang berada dalam keseimbangan ekologis.

Danau, sungai, dan badan-badan air yang ada di bumi umumnya memiliki ekosistem tersendiri. Apabila ekosistem tersebut mengalami perubahan oleh faktor luar (eksogen) atau faktor dalam (endogen), maka ekosistem perairan tersebut sudah digolongkan kedalam keadaan tercemar.

## BAB II. PENCEMARAN AIR

Sumber air yang ada dewasa ini dianggap mulai rawan kemurniannya. Penyebabnya adalah munculnya pencemaran baik oleh alam maupun oleh kegiatan manusia. Air dapat dikatakan tercemar apabila badan air mengandung bahan kimia yang bersifat toksik yang dihasilkan oleh makhluk hidup atau benda lain, dan atau air tersebut diperkaya oleh produktivitas tinggi organisme akuatik karena hadirnya nutrien berlebihan dari limbah domestik, pupuk, atau agroindustri.

Pencemaran air dapat didefinisikan sebagai suatu perubahan kualitas air baik disebabkan oleh faktor alami atau oleh penyebab lain, sehingga mengurangi daya guna air itu sendiri. Atau lebih terperinci lagi dikatakan bahwa *pencemaran air adalah peristiwa masuknya zat-zat ke dalam air yang mengakibatkan kualitas air menurun sehingga membahayakan kesehatan masyarakat secara umum. Masuknya bahan pencemar ke dalam air jelas akan mengakibatkan perubahan sifat fisik, kimia dan biologik perairan. (UU Lingkungan Hidup No.23 tahun 1997).*

Derajat pencemaran pada ekosistem perairan dapat dibedakan menjadi 3 tingkatan, yaitu :

1. *Pencemaran ringan.*

Umumnya disebabkan oleh bahan pencemar alami. Efeknya tidak begitu nyata karena kemungkinan masih dapat diabsorpsi oleh ekosistem itu sendiri. Dalam hal ini, ekosistem masih mampu dengan cepat memperbaiki diri dan beradaptasi sehingga dapat kembali normal tanpa meninggalkan efek yang berarti.

2. *Pencemaran sedang.*

Proses self purification masih mungkin berlangsung, tetapi berjalan sangat lambat.

3. *Pencemaran berat.*

Proses alami tidak mampu lagi dilaksanakan sendiri oleh ekosistem tercemar tadi, sehingga badan air dapat mati jika proses purifikasinya tidak dibantu oleh faktor luar.

Berdasar pada kadar zat pencemar dan waktu kontak antara zat pencemar dengan lingkungan sekitarnya, WHO (World Health Organization) menetapkan 4 tingkatan pencemaran :

1. *Pencemaran tingkat pertama.*

Yakni pencemaran yang tidak menimbulkan kerugian kepada manusia jika dilihat dari kadar zat pencemar yang hadir dan waktu kontakannya dengan lingkungan.

2. *Pencemaran tingkat kedua.*

Yakni pencemaran yang mulai mengakibatkan iritasi (gangguan) pada alat panca indra, serta telah menimbulkan gangguan pada ekosistem.

3. *Pencemaran tingkat ketiga.*

Yakni pencemaran yang sudah mengakibatkan reaksi faal pada tubuh dan menyebabkan sakit yang kronis.

4. *Pencemaran tingkat keempat.*

Yakni suatu pencemaran dimana kadar zat pencemar sudah sedemikian besarnya sehingga menimbulkan gangguan sakit dan bahkan kematian.

### **2.1.Sumber Pencemaran Air.**

Sumber utama pencemaran adalah buangan cair, gas atau padat yang mengandung bahan pencemar. Limbah tersebut dapat berasal dari kegiatan penduduk, industri, agrikultur, run-off dan erosi, kecelakaan pada saat transportasi, kebocoran tangki, pestisida atau bahkan bencana alam. Limbah kegiatan penduduk meliputi: limbah perdagangan, perkantoran, rumah tangga, pengolahan makanan (skala home industri), sistem pengelolaan air di daerah pemukiman. Sedangkan limbah industri meliputi: buangan dari sistem pendingin mesin pembangkit listrik (limbah bersuhu tinggi), buangan dari berbagai tahapan prosesing dalam pabrik. Efluen industri dapat berupa air, bahan organik terlarut, minyak, padatan terlarut, senyawa kimia terlarut (organik maupun anorganik), logam berat, bahan beracun dan lumpur organik.

Secara garis besar, bahan pencemar dapat dikelompokkan menjadi 5, yaitu :

1. Bahan organik lamban. Misalnya debu, pasir, tanah liat.
2. Bahan organik yang mudah teroksidasi. Misalnya: sampah perumahan, kotoran, dan sisa-sisa makanan ternak.
3. Bahan buangan beracun yang berasal dari industri, baik padat maupun cair.
4. Bahan buangan bersuhu tinggi, umumnya dari air pendingin mesin.
5. Bahan buangan radioaktif. Misalnya radon, karbon, dan potassium.

Jenis limbah yang paling potensial menimbulkan pencemaran adalah limbah industri. Limbah ini biasanya mengandung bahan organik dan anorganik. Limbah organik umumnya berasal dari industri pengolahan minuman, pabrik susu, rumah pemotongan hewan, industri penyamakan kulit, industri tekstil, industri kertas dan pulp. Sedangkan limbah anorganik umumnya dihasilkan oleh industri pengolah logam, pabrik kaleng, dan sejenisnya. Polutan industri juga dapat dikategorikan menjadi 3, yaitu sebagai pencemar fisik, khemis, dan biologik.

## **2.2. PARAMETER FISIK**

Warna, suhu, bau, rasa, dan kekeruhan adalah merupakan tolok ukur penting ada tidaknya pencemaran secara fisik.

### **1. Warna.**

Warna merupakan tolok ukur pencemaran yang dapat dilihat secara langsung. Sampah industri dapat dibedakan dengan sampah perdagangan karena umumnya berwarna menyolok. Industri yang banyak andil dalam mengeluarkan buangan warna adalah industri tekstil, petrokimia, industri kimia, dan industri kertas dan pulp.

Standar warna air (menurut standar Cobalt-platinum Santaniello) untuk prasarana umum sebaiknya tidak lebih dari 10 unit, meskipun batas toleransi yang diijinkan adalah 75 unit. Biota akuatik dapat toleransi terhadap air dengan batas maksimum 50 unit. Hal ini terkait dengan zona fotosintetik perairan. Jika unit warna air melebihi 50, penetrasi cahaya berkurang sehingga fotosintesa terhambat. Akibatnya akan terjadi penurunan kadar oksigen perairan. DO yang rendah jelas tidak akan mendukung kehidupan.

### **2. Suhu.**

Naiknya suhu perairan akibat adanya limbah panas dari mesin pendingin menyebabkan kehidupan biota akuatik menjadi kacau, serta mempengaruhi bau, rasa, dan mungkin mengubah kandungan kimia air. Perubahan suhu yang drastis di danau atau sungai dapat memusnahkan tumbuhan di daerah penyangga, akibat lebih lanjut adalah timbulnya erosi. Sebagai contoh, pada perairan bersuhu 8 °C proses fermentasi

berjalan lambat. Tetapi jika suhu perairan naik hingga mencapai 27 °C, maka proses fermentasi akan terpacu hingga 4 kali lebih cepat, sehingga terjadi peningkatan proses nitrifikasi amoniak secara anaerob yang menghasilkan gas-gas berbahaya. Suhu perairan yang mencapai 35 °C akan menyebabkan booming pertumbuhan ganggang hijau-biru, dengan akibat lebih jauh tanaman lain akan kalah bersaing sehingga mati. Sedimentasi yang besar dan penguapan tinggi yang berlangsung lama dapat mengakibatkan erosi yang diikuti kematian danau.

Suhu untuk air yang diperuntukkan bagi kegiatan masyarakat sebaiknya tidak melebihi 30 °C. Penggunaan air bersuhu tinggi dapat mempengaruhi proses fisiologi tubuh manusia.

Suhu dapat merubah keadaan fisik dan kimia suatu bahan pencemar, selain itu meningkatnya suhu menyebabkan tingkat toksisitas limbah juga meningkat. Misalnya, kadar CO<sub>2</sub> pada suhu 1 °C akan mematikan biota air bila mencapai 120 ppm. Tetapi jika suhu naik hingga mencapai 30 °C, maka CO<sub>2</sub> menjadi mematikan meskipun baru mencapai kadar 55 – 60 ppm. Hal semacam ini mungkin terjadi disebabkan karena setiap kenaikan suhu sebesar 10 °C maka kandungan DO mengalami penurunan dan kegiatan metabolisme tubuh dipercepat.

### **3. Bau dan Rasa.**

Bau merupakan tolok ukur yang cukup penting untuk penentuan kondisi limbah. Bau yang tidak dikehendaki dapat timbul akibat adanya proses dekomposisi dari limbah-limbah organik yang menghasilkan gas-gas terlarut dan senyawa organik yang mudah menguap. Kriteria bau berdasar tes kalibrasi n-butyl alkohol adalah 3 unit. Lebih dari itu akan dianggap sangat mengganggu lingkungan.

Rasa juga merupakan indikator pencemaran air. Rasa pada air dapat disebabkan oleh adanya phenol, chloramin (hasil samping klorinasi air minum), bahan anorganik dan organik yang terurai yang bercampur dengan komponen yang telah ada di perairan. Ikan yang terkena bahan pencemar akan menyerap bau sehingga berasa tidak enak.

#### **4. Kekeruhan.**

Kekeruhan air biasanya disebabkan oleh adanya bahan-bahan tersuspensi dan bahan-bahan koloidal yang terdapat dalam perairan. Zat koloid yang menimbulkan kekeruhan antara lain zat terapung yang tidak dapat segera mengendap, atau bahan yang terurai sangat halus. Sedangkan zat tersuspensi antara lain berupa tanah liat, lumpur, bahan organik yang terurai, dan mikroorganisme. Tingkat kekeruhan yang tinggi akan menghambat fotosintesa dalam air, mengurangi jarak pandang, menghambat penetrasi cahaya, menimbulkan gangguan pernafasan pada hewan akuatik. Tingkat kekeruhan yang tinggi juga membahayakan karena dapat meningkatkan toksisitas perairan.

Kriteria kekeruhan air dapat diukur dengan alat turbidimeter Jackson. Air dengan tingkat kekeruhan 50 Jackson unit masih dapat mendukung kehidupan biota akuatik. Air yang baik untuk dikonsumsi seharusnya memiliki kekeruhan kurang dari 10 Jackson unit. Untuk mengurangi tingkat kekeruhan, air dapat diproses dengan cara koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi.

#### **5. Total Padatan Terlarut (TDS, Total Dissolved Solids)**

TDS pada air minum terdiri dari  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$ , dan  $\text{HCO}_3^-$ .  $\text{Cl}^-$  banyak terdapat dalam air tetapi tidak begitu membahayakan bagi kesehatan.  $\text{Mg}^{2+}$  dan  $\text{SO}_4^{-2}$  merupakan bahan peluntur apabila terdapat dalam jumlah diatas standar.  $\text{HCO}_3^-$  banyak terdapat sebagai mineral dalam air dan kurang baik bagi kesehatan.  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  jika bereaksi dengan  $\text{CO}_3^{-2}$  dan  $\text{HCO}_3^-$  akan membentuk kesadahan sementara, tetapi jika bereaksi dengan  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{SO}_4^{-2}$  akan membentuk kesadahan tetap. Kesadahan sementara dapat ditanggulangi dengan pemanasan air, karena selama pemanasan akan dibebaskan sebagian  $\text{CO}_2$ . Kelebihan  $\text{Na}^+$  dapat menimbulkan penyakit liver dan tekanan darah tinggi. Oleh karena itu kandungan  $\text{Na}^+$  pada air minum sebaiknya tidak melebihi 20 ppm. Batas toleransi  $\text{Na}^+$  pada limbah domestik adalah 60 ppm, sedangkan air payau adalah 1000 ppm.

TDS umumnya berasal dari buangan industri dan limbah domestik. TDS yang bersifat toksik (misalnya adanya logam berat pada air berkesadahan tinggi) disarankan kadarnya kurang dari sepertiga TDS standar. Batas toleransi TDS adalah 500 ppm.

TDS yang tinggi dapat mengakibatkan terganggunya proses fisiologik tubuh yakni dehidrasi jaringan. Untuk mengurangi tingginya nilai TDS maka perlu dilakukan penguapan, penyulingan atau pertukaran ion.

Polutan yang mengandung Fe, Pb, dan Zn akan lebih toksik jika berada pada perairan berkesadahan rendah. Toksisitas polutan Pb justru menurun pada air berkesadahan tinggi.

### **2.3. PARAMETER KIMIAWI**

Limbah organik dan anorganik dapat digolongkan sebagai bahan pencemar khemis apabila kehadiran limbah tersebut dapat menyebabkan terjadinya perubahan pH, alkalinitas, dan kandungan senyawa-senyawa tertentu (misalnya N dan S)

#### **1. pH (Derajat Keasaman, power of Hydrogen).**

PH air limbah pabrik tidak selalu sama. Air limbah pabrik susu memiliki pH antara 5,3 – 7,8. Limbah pabrik pulp dan kertas memiliki kadar pH antara 7,6 – 9,5 . Organisme akuatik rata-rata memiliki batas toleransi pH berkisar antara 5 – 9. PH air untuk keperluan masyarakat sebaiknya berkisar antara 6,0 – 8,5. PH air dibawah 5 atau diatas 9 dapat mengakibatkan iritasi pada mata dan kulit. Untuk menjaga stabilitas pH perairan maka diperlukan larutan penyangga yang berfungsi untuk melepaskan atau mengikat ion-ion  $H^+$ . Peralatan yang digunakan untuk mengukur standar pH ada bermacam-macam tergantung pada keperluannya.

Penurunan kandungan pH sangat membahayakan kehidupan akuatik sebab dapat meningkatkan toksisitas suatu bahan pencemar. Misalnya, toksisitas HCN akan meningkat pada pH rendah karena HCN akan terurai menjadi  $H^+$  dan  $CN^-$ . pH menjadi penting karena merupakan faktor pembatas dan merupakan indeks keadaan lingkungan secara menyeluruh.

#### **2. Alkalinitas.**

Alkalinitas berhubungan erat dengan pH larutan dan kandungan  $Ca^{2+}$  perairan. Dalam perairan yang berpH 6,0 – 8,5 dan mengandung 500 ppm TDS, alkalinitas disarankan tidak kurang dari 30 ppm. Jika alkalinitas kurang dari 20 ppm, maka perlu

dinetralkan dengan  $\text{CaCO}_3$ . Asam tidak dianjurkan untuk menetralkan alkalinitas karena dikhawatirkan dapat mengganggu kerja sistem penyangga. Limbah yang dapat mengubah pH dan alkalinitas perairan adalah limbah organik tinggi, atau limbah yang sedang dalam proses fermentasi. Misalnya limbah tapioka, limbah industri pengolahan hasil ternak, industri kimia.

### **3. Nitrogen (N).**

Dalam air limbah (khususnya limbah organik) terdapat lima kelompok ikatan N yang berbeda-beda, yaitu amoniak bebas, amoniak albuminoid, N organik, nitrit dan nitrat. Kelompok N ini biasanya berada dalam bentuk suatu mata rantai dalam siklus nitrogen (salah satu siklus biogeokimia). N dalam bentuk senyawa nitrit adalah yang paling toksik. Konsentrasi nitrit dalam limbah cair tidak boleh lebih dari 1 – 2 ppm. Bila nitrit bersenyawa dengan amino organik maka akan terbentuk N-nitrosamin yang bersifat karsinogen bagi makhluk hidup. Nitrit dapat mempengaruhi proses fisiologik bila bersenyawa dengan Hb darah, karena menghambat transportasi oksigen. Kandungan nitrat pada air disarankan tidak lebih dari 10 ppm, sedangkan kandungan ammonia tidak lebih dari 1 ppm.

### **4. Sulfat dan Sulfida.**

Limbah yang mengandung sulfat dan sulfida tinggi umumnya berasal dari industri kertas dan pulp, industri tekstil, tambang minyak, industri kimia, industri gas, dan proses alami. Selain merugikan bagi tanaman, sulfat dapat menyebabkan kerapuhan selokan (merusak semen) dan korosif bagi logam. Penurunan kadar S dari pembusukan limbah organik menjadi sulfida akan menghasilkan gas ( $\text{H}_2\text{S}$ ) yang berbau menyengat dan tidak menyehatkan.  $\text{H}_2\text{S}$  mampu menembus membran sel hidup, dan menjadikan sel bersifat asam meskipun berada dalam media netral atau alkali.

Batas toleransi tertinggi untuk sulfat pada perairan normal adalah 250 ppm, namun akan lebih baik jika kandungannya tidak lebih dari 50 ppm. Kadar sulfida perairan yang mencapai 25 ppm dapat mematikan biota air dalam waktu 1 – 3 hari.

## **2.4. PARAMETER BIOLOGIK**

Limbah domestik maupun limbah industri (khususnya yang berupa bahan organik atau mikroorganisme) yang mampu menimbulkan perubahan kadar BOD dan DO perairan dianggap juga sebagai pencemar biologik. Sumber pencemar biologik ini antara lain adalah limbah-limbah organik dari industri makanan olahan, limbah pasca panen, limbah rumah sakit, limbah dari industri fermentasi.

### **1. Oksigen Terlarut (DO, Dissolved Oxygen).**

DO adalah kandungan oksigen yang terlarut di dalam air. Sumber oksigen berasal dari udara (oksigen berdiffusi ke permukaan air), hasil fotosintesa tumbuhan air, dan hasil aktivitas mikroorganisme tertentu. Daya larut oksigen pada air limbah hanya mencapai 95 % dibandingkan dengan daya larutnya pada air tawar normal.

Semakin banyak limbah organik yang masuk ke perairan maka kebutuhan akan oksigen bagi bakteri pengurai akan semakin tinggi sehingga DO menjadi menurun. Selain itu, kadar DO juga ditentukan oleh pengenceran limbah, kadar BOD, suhu, tipe dekomposer, dan kemampuan perairan dalam mengabsorpsi oksigen udara. Penurunan DO dapat menyebabkan stres lingkungan. DO yang kurang dari 2 ppm dapat menyebabkan penyakit kekurangan oksigen (hipoksia), bahkan kematian biota air.

Beberapa zat racun akan bertambah toksik pada kadar oksigen yang rendah karena aktivitas respirasi hewan akuatik meningkat.

### **2. BOD (Biological Oxygen Demand)**

BOD sangat penting untuk diukur guna mengetahui kekuatan daya cemar air limbah, sampah industri, dan air tercemar lainnya. Dalam usaha pengendalian pencemaran, BOD merupakan parameter utama berhasil tidaknya pembenahan limbah yang dilakukan. BOD diukur berdasar jumlah DO yang dibutuhkan oleh bakteri guna menguraikan bahan organik yang dapat dibusukkan menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

Jika bahan organik dalam limbah mengandung juga bahan toksik, maka proses reaksi menjadi terhambat karena respirasi bakteri terganggu. Berkurangnya oksigen

selama biooksidasi selain digunakan untuk oksidasi bahan organik, juga digunakan dalam proses sintesis sel oleh mikroorganisme.

Kandungan BOD untuk perairan normal biasanya sebesar 5 ppm, sedangkan pada air limbah sebaiknya tidak lebih dari 80 ppm. Kandungan BOD tertinggi sejauh ini dijumpai pada limbah buangan tekstil, yaitu sebesar 200 – 10.000 ppm.



### **BAB III. EFEK POLUTAN**

#### **3.1. Efek polutan secara fisik.**

Padatan terlarut biasanya terbiodegradasi dalam waktu lama sehingga menyebabkan turunnya DO perairan. Padatan ini dapat terakumulasi perlahan di permukaan air, atau terendap di tepi dan dasar sungai. Akibat adanya endapan maka daya absorpsi sinar matahari menurun dan mengakibatkan fotosintesa berkurang. Keadaan semacam ini menjadikan DO perairan menurun dan menghambat kehidupan dekomposer di dasar sungai.

Turbiditas juga akan menurun dengan hadirnya padatan tersuspensi. Hal ini menghambat kemampuan hewan dalam mencari makanan, serta mengganggu respirasi.

Limbah panas akan meningkatkan suhu air. Akibatnya stabilitas ekosistem akan terganggu karenanya.

Limbah minyak dan lemak akan menghambat reoksigenasi perairan.

#### **3.2. Efek oksidatif.**

Aktivitas oksidasi ada 2 cara yakni:

- Oksidasi biologis (BOD, DO). Untuk menguraikan polutan organik dibutuhkan mikroorganisme, oleh karena itu kebutuhan oksigen akan meningkat.
- Oksidasi khemis (COD) untuk menguraikan bahan polutan anorganik.

Kedua aktivitas tersebut memerlukan DO yang cukup, meningkatkan BOD dan COD perairan, sekaligus menurunkan kandungan DO yang telah ada sebelumnya. Oksidasi khemis terjadi bila tidak ada bakteri yang sesuai untuk biodegradasi atau ada tetapi jumlahnya tidak mencukupi.

#### **3.3. Efek polutan secara khemis.**

*Toksin* (organik maupun anorganik) adalah suatu substansi kimia yang dapat menyebabkan pelukaan, ketidakseimbangan, atau membunuh berbagai jenis makhluk hidup. Toksin dapat diabsorpsi ke dalam jaringan. Efek yang ditimbulkannya tergantung pada konsentrasinya, jenisnya, dan proses metabolismenya di dalam tubuh makhluk hidup. Jika jaringan mampu mengeluarkan toksin, merusak atau menonaktifkan toksin

maka kerusakan yang ditimbulkannya akan sangat minim. Tetapi jika toksin terakumulasi secara terus menerus, maka kemungkinan akan menimbulkan efek letal pada organisme. Kemampuan survive organisme sangat tergantung pada kemampuannya bertoleransi, konsentrasi toksin yang terserap, dan kemampuan tubuh dalam memetabolisme toksin. Toksin yang bercampur logam berat merupakan racun fisiologik, yaitu mempengaruhi kerja enzim di tingkat seluler, menghambat kontrol enzim respirasi, fotosintesa dan pertumbuhan.

Asam dan alkali cukup berbahaya karena mengubah pH air. Perubahan pH akan mempengaruhi aktivitas enzim, dan dapat mengubah derajat toksisitas sianida dan sulfida.

### **3.3.1. Efek polutan nutrisi secara kimia.**

Nutrisi kimia penting untuk metabolisme dan mempertahankan tingkat pertumbuhan makhluk hidup. N dan P dalam jumlah kecil cukup untuk menjaga keseimbangan pertumbuhan secara biologis. Peningkatan N dan P akibat proses biodegradasi disebut *eutrofikasi* yaitu menyebabkan peningkatan kecepatan pertumbuhan. Perairan dalam kondisi normal dinamakan *oligotrofi*. Misalnya, cepatnya pertumbuhan algae akan mengurangi penetrasi cahaya sehingga menghambat proses reoksigenasi perairan. Akibat lebih jauh, algae akan mengalami kematian, diikuti dengan proses biodegradasi sehingga oksigen perairan menurun dan menciptakan kondisi anaerob.

### **3.3.2. Efek polutan mikroorganisme.**

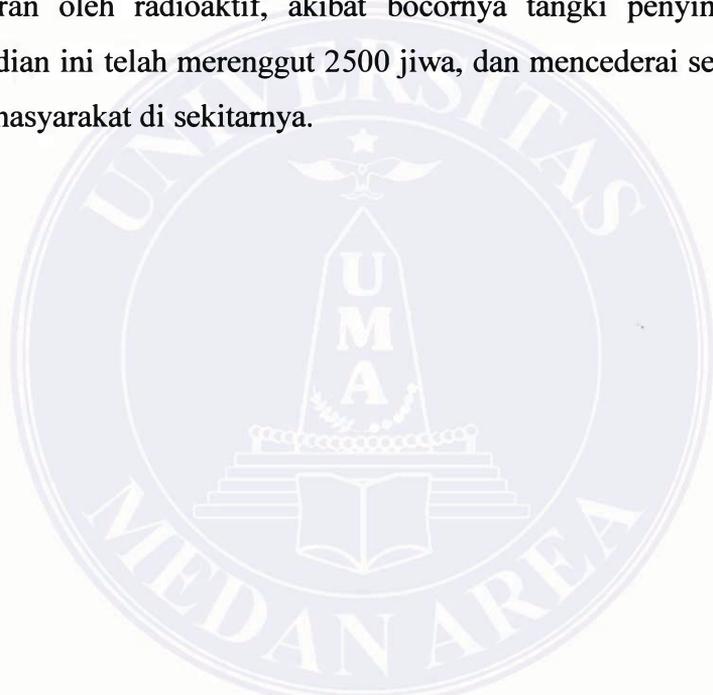
Limbah yang mengandung organisme patogen (umumnya limbah dari industri farming atau rumah sakit) dapat menularkan penyakit. Misalnya limbah yang mengandung bakteri menyebabkan munculnya penyakit tifus, kolera, disentri dan gastroenteritis. Limbah yang mengandung virus dapat menyebabkan hepatitis dan poliomyelitis.

Limbah yang mengandung hewan parasit dapat menyebabkan antara lain cacangan.

### 3.3.3. Efek polutan radionukleida.

Penggunaan energi nuklir meningkatkan limbah radioaktif yang dibuang ke lingkungan. Kebocoran limbah nuklir di lautan dapat mengakibatkan tingkat korosifitas air laut meningkat. Radioaktif itu sendiri sebagian akan terbawa ke atmosfer melalui penguapan air laut, menjadi debu (aerosol) sehingga mengganggu pernafasan, atau masuk ke dalam tubuh tumbuhan atau hewan. Sebagian limbah radioaktif akan masuk ke tubuh bumi menjadi bagian dari sedimen lautan yang dapat terabsorpsi oleh makhluk hidup melalui jaring-jaring makanan (food web) atau rantai makanan (food chain). Limbah radioaktif dapat juga dilepaskan kembali ke perairan melalui proses daur biogeokimia.

Tragedi Bhopal di India yang terjadi pada akhir tahun 1984 merupakan contoh terjadinya pencemaran oleh radioaktif, akibat bocornya tangki penyimpanan bahan mentah nuklir. Kejadian ini telah merenggut 2500 jiwa, dan mencederai secara akut atau kronik pada ribuan masyarakat di sekitarnya.



## BAB IV. INDIKATOR PENCEMARAN PERAIRAN

Keberhasilan dalam mencegah pencemaran tidak hanya tergantung pada kontrol dan pengolahan limbah saja, tetapi juga pemantauan yang teratur. Dengan adanya hasil pemantauan, maka dapat ditentukan langkah-langkah pengendalian pencemaran. Pemantauan dapat dilakukan dengan cara :

1. Mengukur langsung kadar bahan pencemar atau mengidentifikasi substansi polutan yang penting, misalnya kandungan oksigen, karbondioksida.
2. Menggunakan indikator biologik, misalnya tumbuhan, hewan atau mikroorganisme yang peka terhadap perubahan lingkungan. Variasi perubahan keadaan lingkungan dapat diketahui melalui keberadaan indikator biologik tadi.

Bioindikator pencemaran air haruslah memenuhi persyaratan mendasar sebagai berikut :

1. Mudah diidentifikasi.
2. Mudah dijadikan sampel dan mudah dihitung secara kuantitatif.
3. Distribusinya kosmopolitan, kelimpahannya dapat untuk menganalisis index diversitas perairan, keanekaragamannya rendah.
4. Memiliki peran khusus secara ekonomis atau berperan penting dalam lingkungannya.
5. Dapat didomestikasi di laboratorium, dan dapat menimbun bahan pencemar di tubuhnya atau memberikan respon spesifik terhadap bahan pencemar.

Berdasar index diversitas bioindikator (khususnya dari jenis benthos), maka klasifikasi derajat pencemaran air dapat ditentukan sebagai berikut:

| <b>DERAJAD<br/>PENCEMARAN AIR</b> | <b>INDEX DIVERSITAS<br/>KOMUNITAS</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Tidak tercemar                    | >2,0                                  |
| Tercemar ringan                   | 1,6 – 2,0                             |
| Tercemar sedang                   | 1,0 – 2,0                             |
| Tercemar berat/parah              | < 1,0                                 |

Beberapa contoh indikator biologik pencemaran perairan:

1. *Bakteri coliform* (bakteri apathogen) merupakan indikator pencemaran perairan oleh limbah manusia atau hewan ( khususnya faeces). Mikroorganisme apathogen (misalnya *E. coli*) maupun pathogen (misalnya *Vibrio cholerae*, *Shigella dysenteriae*, *Entamoeba histolytica*, *Salmonella typhosa*) sering dijumpai di perairan.
2. *Algae* (ganggang hijau). Ledakan pertumbuhan algae menunjukkan bahwa perairan tersebut kaya akan nutrien yang berasal dari limbah organik (khususnya limbah domestik).
3. *Ikan dan Avertebrata*. Kematian ikan di perairan sungai menunjukkan salah satu bukti adanya pencemaran air yang kian meningkat. Contoh klasik adalah kematian Danau Erie (USA) akibat akumulasi limbah dari ratusan industri dan pemukiman di sekitarnya. Ikan-ikan dari jenis *Salvelinus namaycush*, *Coregonus clupeiformis*, *Essox lucious* mati terdesak oleh pertumbuhan pesat dari *Cyprinus carpio*, *Dorosoma sp.*, dan *Aplodinotus sp.* Danau Erie tidak mampu lagi mengadakan self purification karena menanggung beban pencemaran yang berlebihan sehingga rusak berat dan dinyatakan dalam keadaan mati.
4. *Tumbuhan* juga dapat dijadikan indikator pencemaran air, misalnya jenis *Hydrilla sp.*, *Lemna sp.*, *Eichornia crassipes*, *Lichenes*.
5. Dari jenis *plankton*, misalnya *Artemia*, *Dunaliella*, dsb.

#### **4.1. Ikan dan Avertebrata Sebagai Bioindikator.**

Pemantauan pencemaran dan pengujian bahan pencemar menggunakan indikator biologik dewasa ini dianggap lebih tepat. Ikan merupakan indikator yang penting, sebab ikan mudah didapat sepanjang tahun, mudah dipelihara dan ditenakkan baik di persawahan maupun di laboratorium. Selain itu, ikan merupakan hewan uji yang potensial untuk menentukan tingkat toksisitas suatu bahan pencemar. Jenis ikan yang direkomendasikan untuk penelitian pemantauan lingkungan adalah dari familia: *Cantrarchidae*, *salmonidae*, *Cyprinidae*, dan *Catostomidae* yang kesemuanya meliputi sekitar 28 spesies. Jenis avertebrata juga dapat digunakan, misalnya *bivalvia*, *colebolla*, *Drossophila sp.*

Berikut ini adalah daftar hewan uji untuk keperluan penelitian di laboratorium dan sekaligus juga sebagai indikator biologik terhadap pencemaran perairan :

**A. Ikan :**

- |                                       |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. <i>Perca flavescens</i> .          | 18. <i>Notropis delicious</i> .       |
| 2. <i>Micropterus salmoides</i> .     | 19. <i>Hypognathus nuchalis</i> .     |
| 3. <i>Lepomis incisor</i> .           | 20. <i>Pimephales promelas</i> .      |
| 4. <i>Lepomis humilis</i> .           | 21. <i>Cyprinus carpio</i> .          |
| 5. <i>Lepomis macrochirus</i> .       | 22. <i>Carassius auratus</i> .        |
| 6. <i>Oncorhynchus kisutch</i> .      | 23. <i>Salmo irideus</i> .            |
| 7. <i>Salvelinus fontinalis</i> .     | 24. <i>Salmo clarkii</i> .            |
| 8. <i>Ameiurus nebulosis</i> .        | 25. <i>Salmo gairdneri</i> .          |
| 9. <i>Ichtaurus punctatus</i> .       | 26. <i>Lagodon rhomboidea</i> .       |
| 10. <i>Agosia nubila</i> .            | 27. <i>Gumatogaster aggregata</i> .   |
| 11. <i>Cyprinodon variegatus</i> .    | 28. <i>Leptocottus armatus</i> .      |
| 12. <i>Fundulus heteroclitus</i> .    | 29. <i>Citharichthys stigmatæus</i> . |
| 13. <i>Fundulus similis</i> .         | 30. <i>Paralichthys dentatus</i> .    |
| 14. <i>Medinia sp.</i>                | 31. <i>Paralichthys lethostigma</i> . |
| 15. <i>Casterosteus aculeatus</i> .   | 32. <i>Parophrys vetulus</i> .        |
| 16. <i>Leociscus balteatus</i> .      | 33. <i>Lepiostomus xanthurus</i> .    |
| 17. <i>Notemigonus chrysoleucas</i> . | 34. <i>Lepiosteus platostomus</i> .   |

**B. Amphipoda :**

- |                                   |                                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. <i>Gammarus fasciatus</i> .    | 4. <i>Crangon sp.</i>          |
| 2. <i>Gammarus lacustris</i>      | 5. <i>Eucrangonix gracilis</i> |
| 3. <i>Gammarus pseudolimnaeus</i> |                                |

**C. Entomostraca :**

- |                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| 1. <i>Daphnia magna</i> . | 4. <i>Cypris sp.</i>  |
| 2. <i>Daphnia pulex</i> . | 5. <i>Cyclops sp.</i> |
| 3. <i>Bosmina sp.</i>     |                       |

**D. Kerang air tawar :**

- |                                  |                                    |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1. <i>Tritogonia verrucosa</i> . | 5. <i>Actinomaia carinata</i> .    |
| 2. <i>Megalonalas gigantea</i> . | 6. <i>Lampsilis anodontoides</i> . |
| 3. <i>Quadrula trapezoides</i> . | 7. <i>Lampsilis siliquoidea</i> .  |
| 4. <i>Eusconaia undata</i> .     |                                    |

**E. Avertebrata lain :**

- |                          |                                      |
|--------------------------|--------------------------------------|
| 1. <i>Orconectes sp.</i> | 3. <i>Procambarus sp.</i>            |
| 2. <i>Cambarus sp.</i>   | 4. <i>Pacifastacus leniusculus</i> . |

- |                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 5. <i>Pteromarcys sp.</i>     | 12. <i>Panaeus duorarum.</i>    |
| 6. <i>Baetis sp.</i>          | 13. <i>Panaeus aztecus.</i>     |
| 7. <i>Ephemerella sp.</i>     | 14. <i>Palaemonetes sp.</i>     |
| 8. <i>Hexagenia limbata.</i>  | 15. <i>Pandalus jordani.</i>    |
| 9. <i>Hexagenia bilinata.</i> | 16. <i>Callinectes sapidus.</i> |
| 10. <i>Chironomus sp.</i>     | 17. <i>Cancer magister.</i>     |
| 11. <i>Panaeus setiferus.</i> |                                 |

Makrobentos dari jenis *Tubifex sp.*, *Limnodrillus* dan *Melanoides tuberculata*, serta larva lalat *Eristalis* dan *Psychoda* merupakan indikator terhadap DO perairan yang rendah, bahan organik yang tinggi. Pdatan terlarut yang tinggi dalam perairan diindikasikan dengan hadirnya *Hydropsyche* dan *Simulium*. Hewan bercangkang *Physa sp.*, dan cacing *Brachiurusowerbyi* merupakan indikator pencemaran panas yang melebihi 30oC.

Berikut ini contoh-contoh bioindikator (khususnya dari jenis makro invertebrata) yang terdapat pada badan air tercemar yang derajat pencemarannya bervariasi :

- a. Indikator air bersih : *Ephemera*, *Ecdyonurus*, *Leuctra*, *Nemerella*, *Perca*.
- b. Indikator pencemaran ringan: *Amphineura*, *Ephemerella*, *Caenis*, *Gammarus*, *Baetis*, *Volvata*, *Bythynia*, *Hydropsyche*, *Limnodrillus*, *Rhyacophyla*, *Schistosoma*, *Trichoptera* dan *Ephemeroptera*.
- c. Indikator pencemaran sedang: *Asellus*, *Sialis*, *Limnaea*, *Physa*, *Sphaerium*.
- d. Indikator pencemaran berat: *Nereis*, *Chironomus*, *Tubifex*, *Eristalis*.

#### **4.2. Mikroorganisme Sebagai Bioindikator.**

Air, baik itu berupa air bersih maupun air kotor, merupakan media hidup terbaik bagi mikroorganisme. Secara umum mikroorganisme merupakan bioindikator terhadap kondisi tercemar dan tidaknya suatu perairan.

Jumlah dan jenis mikroorganisme di perairan umum pada dasarnya ditentukan oleh :

##### **1. Sumber air.**

Air hujan banyak mengandung mikroorganisme aerogen yang berasal dari udara.

Air laut merupakan:

- a. habitat asli bagi bakteri indigenous laut dari jenis *Beggiatoa*, *Thiotrix*, *Thiovolum* dan *Thiobacillus*.

- b. habitat kedua bagi bakteri transien (habitat aslinya bukan dari laut, tetapi dapat beradaptasi terhadap kadar garam tinggi) yakni *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Actinomyces* dan *Sarcina*.
- c. cocok bagi bakteri halofilik (menyukai kadar garam tinggi) misalnya *Spirillum* dan *Vibrioparahaemolyticus*.
- d. habitat yang baik bagi bakteri anaerob fotosintetik sulfur hijau dan ungu yang biasanya terdapat di bawah “kanopi” ganggang laut.

2. *Komponen nutrisi dalam air.*

Air buangan terkandung justru mengandung komponen nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme. Misalnya, air buangan yang mengandung besi sering ditumbuhi bakteri besi (*Ferrobacillus ferrooxidans*), air buangan yang mengandung H<sub>2</sub>S ditumbuhi oleh bakteri belerang (*Thiobacillus thiooxidans*), air yang mengandung metana ditumbuhi oleh bakteri pengoksidasi metana (*Methanobacterium*), dan air buangan yang mengandung bahan organik tinggi merupakan media yang baik bagi bakteri saprofit organotrofik.

3. *Komponen beracun.*

Kehadiran komponen beracun dalam air mengakibatkan bakteri mengalami gangguan hidup. Hanya bakteri tertentu yang dapat menyesuaikan diri saja yang dapat bertahan hidup, atau hanya bakteri yang mampu mengolah bahan beracun tadi menjadi senyawa lain dapat survive.

4. *Kehadiran organisme air.*

Kehadiran organisme tertentu dapat membatasi jumlah dan jenis mikroorganisme perairan. Misalnya, plankton akan memangsa bakteri, ganggang dan plankton lain sehingga mengurangi jumlah mikroorganisme. Protozoa dan bakteriophaga dapat membunuh bakteri lain. Bakteri penghasil eksotoksin atau endotoksin dapat merugikan bakteri lain dengan cara allelopathy.

5. *Faktor fisik.*

Faktor fisik seperti suhu, tekanan osmotik, aerasi, jenis nutrisi atau polutan dan penetrasi cahaya matahari sangat mempengaruhi jumlah dan jenis bakteri. Air yang mengandung :

- a. tanaman atau hewan mati banyak ditumbuhi bakteri coliform dari jenis *Enterobacter*
- b. kotoran manusia atau hewan cocok untuk *E coli* dan *Clostridium perfringens*,
- c. sampah organik cocok untuk bakteri anaerob seperti *Desulfovibrio* dan *Clostridium*,
- d. tanah, dapat ditumbuhi oleh bakteri saprofit tanah yaitu *Spirillum*, *Sarcina*, *Vibrio*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Leptospira*, *Sphaerotillus*.
- e. Air permukaan banyak mengandung bakteri khromogenik yaitu *Serratia marcescens* (merah), *Flavobacterium aurantiacum* (oranye), *Chromobacterium violaceum* (violet) dan *Pseudomonas fluorescens*.

Dari seluruh jenis bakteri yang telah disebutkan sebelumnya, hanya 2 jenis saja (*Escherichia coli* dan *Clostridium perfringens*) yang mendapatkan perhatian cukup serius untuk bidang indikator pencemaran perairan. Menurut para pakar lingkungan, kedua bakteri tersebut menjadi “primadona” bioindikator pencemaran air karena alasan berikut ini :

1. Bakteri tersebut merupakan bakteri komensal di dalam saluran pencernaan manusia maupun hewan berdarah panas (homiotherm) dan tidak hidup di saluran pencernaan hewan lain, sehingga cocok sebagai indikator limbah fekal (kotoran).
2. Bakteri ini dapat hidup lebih lama daripada bakteri lain, dan hanya dapat ditemukan pada limbah yang mengandung mikroorganisme patogen enterik.
3. Dapat ditemukan bila diuji dengan peralatan yang spesifik dan sensitif (namun mudah dikerjakan) meskipun jumlahnya sangat sedikit.
4. Aman bagi kesehatan penguji.
5. Banyak sedikitnya jumlah bakteri yang ditemukan dapat digunakan untuk menentukan tinggi rendahnya pencemaran yang ditimbulkan.

### ***Escherichia coli***

*E coli* adalah bakteri fekal berbentuk koliform yang secara normal terdapat dalam faeces hewan atau manusia. Bakteri sejenis tetapi yang tergolong non-fekal adalah *Enterobacter aerogenes*, berasal dari hewan atau tanaman mati. Ada beberapa persamaan dan juga perbedaan antara keduanya, yakni :

| KARAKTERISTIK UJI | <i>Escherichia coli</i>  | <i>Enterobacter aerogenes</i>   |
|-------------------|--|---|
| Asal              | Faeces manusia dan hewan   | Hewan dan tumbuhan mati   |
| Bentuk            | Coliform (batang)  | Coliform (batang)   |
| Familia           | Enterobacteriaceae   | Enterobacteriaceae  |
| Sifat             | *) Gram negatif (-)<br>*) Dapat memfermentasi laktosa, memproduksi asam dan gas pada suhu 37oC dan 44,5 oC dalam waktu 48 jam<br>*) Dapat mereduksi nitrat menjadi nitrit<br>*) bersifat katalase (+) dan oksidase (-) | *) Gram negatif (-)<br>*) Tidak dapat memfermentasi laktosa, tidak dapat memproduksi asam dan gas pada suhu 44,5oC. |
| <b>Uji IMViC</b>  |  |   |
| - Indol           | Dapat memproduksi indol dari triptofan   | -   |
| - Merah metil     | Memfermentasi glukosa untuk menghasilkan asam sehingga menurunkan pH perairan menjadi 4,5 (medium jadi merah jika diberi indikator MM)   | -   |
| - Voges-Proskauer | Tidak membentuk asetil metil karbinol (asetoin) dari glukose   | +   |
| - Citrat          | Sitrat bukan satu-satunya sumber karbon  | +   |

Menurut Dirjen POM dari Depkes RI, air yang memenuhi syarat sebagai air minum adalah air yang tidak mengandung bakteri koli di setiap 100 ml air uji.

Apabila *E coli* tidak dapat dijadikan tolok ukur lagi (mungkin mati oleh pencemaran), maka alternatif pengujian kualitas air dapat menggunakan bakteri lain yaitu dari jenis streptococcus fekal, misalnya *S faecalis*, *S faecium*, *S durans*, *S bovis*, dan *S equinus*. Streptococcus hanya sebagai pilihan indikator kedua karena hasil ujinya kadang meragukan mengingat bahwa:

- Bakteri ini juga ditemukan di lingkungan diluar saluran pencernaan (*misalnya S faecalis var. liquefaciens*).
- Bakteri *S bovis* dan *S equinus* tidak ditemukan pada faeces manusia, tetapi hanya terdapat pada kotoran ternak atau hewan peliharaan.
- Ketahanan hidup dan sensitivitasnya terhadap lingkungan jauh lebih kuat daripada *E coli*. Misalnya, *S faecalis* yang diinkubasi di air selama 20 hari pada suhu 20oC hanya berkurang hingga 1/10-nya saja, sedangkan inkubasi yang sama terhadap *E coli* menyebabkan populasi berkurang hingga 1/100 kalinya.

d. *Streptococcus* yang hidup di pencernaan sangat tahan terhadap bilus (cairan empedu) dan dapat bertahan hidup pada suhu 45oC.

Mengingat akurasi yang diragukan, maka uji terhadap *Streptococcus* hanya dibuat apabila : jarak antara tempat sampling dan tempat pengujian cukup jauh, sampel diduga mengandung patogen yang tahan hidup dalam air, atau jika sampel telah terkena disinfektan sehingga koliform fekal yang sensitif diduga telah terbunuh.

#### ***Clostridium perfringens*.**

*C. perfringens* merupakan bakteri gram positif berbentuk batang, dapat membentuk spora tahan kering dan tahan panas (lebih kuat daripada bakteri patogen), bersifat anaerob (namun juga dapat hidup dalam kondisi aerob), bersifat patogen. Bakteri ini termasuk mikroflora normal dalam saluran pencernaan, yang juga dapat hidup dalam debu atau tanah. *C. perfringens* sebagai indikator perairan memiliki banyak kelemahan, tetapi sebagai indikator pencemaran fekal pada tanah bakteri ini sangat cocok.

Bakteri patogen dari saluran pencernaan menyukai pH air 5-9. Jenis *Salmonella typhi* dapat hidup 15-25 hari di air steril, 1-4 hari di air sungai, 2 hari di selokan. Sedangkan jenis *Vibrio cholera* dapat hidup 1-5 hari di air steril, 2-3 hari di air sungai, dan 0,5-1,5 hari di selokan.

#### **4.3. Ganggang dan Tumbuhan Sebagai Bioindikator.**

Kangkung (*Ipomoea aquatica*) merupakan salah satu tanaman indikator pencemaran Cd, Hg, Pb, Cu, Mn dan Zn. Eceng gondok (*Eichornia crassipes*) merupakan indikator pencemaran bahan organik limbah. Ganggang hijau biru (*Microcystis sp*) menunjukkan adanya pencemaran organik atau pupuk dengan kadar N tinggi. Sedangkan algae hijau biru yang lain (*Anabaena sp.*) merupakan indikator pencemaran fosfat. Ganggang merah (*Rhodophyceae*) merupakan indikator pencemaran limbah panas.

## BAB V. TOKSISITAS PENCEMARAN AIR

Sebagian besar bahan pencemar akan bersifat toksik jika berada dalam keadaan campuran. Sangat jarang sebenarnya ditemukan adanya bahan pencemar tunggal dalam suatu tempat penampungan limbah. Bahan pencemar yang telah masuk ke perairan mungkin dapat bersifat :

1. *Aditif (akumulatif)*, yaitu apabila limbah yang dibuang menambah jumlah limbah yang telah ada sebelumnya. Akumulasi limbah menyebabkan volume limbah meningkat sehingga menjadikannya toksik atau lebih toksik.
2. *Antagonis*, bila limbah baru yang masuk bekerja berlawanan dengan limbah sebelumnya sehingga daya toksis limbah secara keseluruhan justru berkurang.
3. *Sinergis*, yaitu apabila limbah baru yang masuk ke perairan justru menambah daya toksik limbah yang telah ada sebelumnya.

Suatu senyawa toksik umumnya lebih besar pengaruhnya jika masuk ke perairan dibanding bila senyawa tersebut berada lepas di udara atau medium lain, sebab daya sebarannya menjadi tinggi sehingga dapat bereaksi mematikan dalam waktu relatif singkat (efek akut).

Untuk mengetahui resiko penggunaan air yang mengandung selain H<sub>2</sub>O, dapat dilakukan 2 cara pendekatan, yaitu :

1. Tiap substansi atau kelompok substansi harus diujikan pada indikator biologik tertentu guna mengetahui konsentrasi toksikan dan daya toksisitas perairan tersebut. Ilmu untuk uji ini disebut *Toksikologi*.
2. Tiap substansi atau kelompok substansi diujikan pada suatu populasi yang siap untuk mengkonsumsi air tersebut. Ilmunya disebut *Epidemiologi*.

Penentuan toksisitas suatu senyawa toksik biasanya mempergunakan metode Bioassay. Bioassay diartikan sebagai penentuan kekuatan relatif suatu substansi dengan cara membandingkan efek substansi tersebut pada organisme uji dengan standar yang telah disediakan. Sedangkan pengertian toksisitas dalam hal ini adalah sebagai kemampuan suatu molekul bahan kimia atau senyawa kimia yang dapat menimbulkan

kerusakan pada saat mengenai bagian dalam atau luar tubuh indikator penguji (biasanya hewan uji).

Pengujian terhadap pencemaran ada beberapa tahap, yaitu :

1. *Screening test*, yaitu uji penentuan toksisitas terendah limbah dari suatu kelompok produk atau bahan kimia yang dijumpai di sungai atau danau, meskipun kadar maksimum bahan pencemar tadi tidak sampai menimbulkan kematian.
2. *Uji penentuan kriteria kualitas air*, yaitu uji penentuan atau pengukuran konsentrasi bahan pencemar di perairan yang daya toksisitasnya 400 kali lebih kecil dari hasil pengukuran  $LC_{50-96}$  pada uji screening test sebelumnya.
3. *Uji pemantauan limbah menggunakan bioindikator*. Ini diperlukan untuk mengetahui substansi kompleks yang ada dalam limbah dan pengaruhnya dalam jangka waktu tertentu.
4. *Legal Test*, merupakan uji toksisitas yang dilengkapi dengan data pendukung (data sekunder) lainnya.
5. *Uji pemantauan badan air yang terkena limbah*. Merupakan uji dan sekaligus pemantauan yang lengkap untuk mendapatkan akurasi data yang valid.

Pengujian pencemaran jelas melibatkan penelitian toksisitas didalamnya. Uji toksisitas sendiri harus dilihat tujuannya, apakah informasi yang diperlukan dalam bentuk segera (perlu *uji toksisitas akut*, yaitu uji dosis racun yang mematikan bioindikator dalam waktu singkat) ataukah dalam bentuk jangka panjang (perlu *uji toksisitas kronik*, yaitu uji dosis racun untuk selama hidup bioindikator atau minimal 1/3 lifespan bioindikator).

Tahapan pengujian toksisitas secara terperinci terdiri dari 3 langkah uji, yakni :

1. *Observatory Test*. Tahap ini boleh dilewati apabila sebelumnya telah tersedia data penelitian serupa yang telah dibakukan, sehingga data tersebut dapat digunakan acuan. Tetapi jika data serupa belum pernah diujikan, maka tahap ini harus dilakukan. Tujuannya adalah untuk mengetahui besarnya kadar yang mulai menimbulkan pengaruh terhadap bioindikator.

2. *Exploratory Test (Range Finding Test, Uji pendahuluan)*. Tahap uji ini diperlukan untuk mencari kadar terdekat dari bahan pencemar yang sedang diuji dengan melihat efek lethal atau sublethal yang ditimbulkannya.
3. *Full Scale Test (Definitive Test, Uji sesungguhnya)*. Merupakan tahap untuk mendapatkan nilai akurat dari kadar sesungguhnya yang merugikan organisme. Dengan membandingkan antara hasil uji full scale test yang satu terhadap yang lain, dengan menggunakan lebih dari dua spesies dalam klasifikasi yang sama, maka akan didapatkan nilai ambang batas (NAB) yang diijinkan bagi bahan pencemar yang diteliti.

Setiap kali mengadakan pengujian toksisitas, baik uji awal maupun uji sesungguhnya, bioindikator yang akan dijadikan bahan uji harus terlebih dahulu diaklimasikan kepada kondisi laboratorik. Sebagai contoh, hewan uji harus memiliki umur yang sama (misalnya 2 bulan untuk tikus), ukuran tubuh relatif sama (misalnya 3-5 cm untuk ikan), dari spesies/varietas/strain yang sama, jenis kelamin sama, kesehatan memadai, warna sama, nutrisi selama pemeliharaan juga sama, sumber pengambilan bioindikator harus di satu tempat yang sama, dan perlakuan menjelang uji coba juga harus seragam.

Jika bioindikatornya berupa hewan maka harus dipuaskan selama 2-4 hari sebelum percobaan (sehingga dapat bereaksi absortif terhadap toksikan/polutan). Apabila sangat terpaksa sehingga sumber pengambilan bioindikator berasal dari tempat berbeda, maka hewan harus dipelihara selama minimal satu bulan sebelum digunakan untuk percobaan. Hal ini perlu untuk keseragaman kondisi anatomis dan fisiologis, serta menghindari stress pada hewan uji.

Jika tumbuhan dipakai sebagai bioindikator, maka turgor tanaman harus diupayakan mencapai stabilitas seperti saat awal ditanam. Atau yang terbaik adalah mempersiapkan tanaman dalam polibag atau secara hidroponik dengan kondisi seragam. Untuk tanaman yang dipetik (kangkung, cocor bebek), disetek atau merambat, maka tanaman harus ditunggu untuk mengeluarkan cabang baru/stolon selama dipelihara, dan cabang baru/stolon inilah yang digunakan untuk tanaman uji.

Ruang lingkup toksikologi dalam hal ini sangat luas yakni mencakup penanganan

dan penelitian bahan-bahan tertentu misalnya senyawa-senyawa terapis (untuk diagnostik, pencegahan, atau terapeutik), racun, insektisida, pestisida, zat pengatur tumbuh, penyerbuk buatan, makanan tambahan untuk ternak, logam, bahan tambang, bahan pencemar, kosmetika, komponen makanan, vitamin, bahkan asam amino dalam dosis yang dapat mempengaruhi kerja fisiologik. Oleh karena itu, disiplin ilmu Toksikologi berkembang sangat pesat dan terspesialisasi menjadi toksikologi analitik, toksikologi klinik, toksikologi forensik, toksikologi kerja, toksikologi hukum, toksikologi lingkungan, dan sebagainya.

Tujuan khusus dari toksikologi itu sendiri adalah :

1. *Mencari nilai kuantitatif* tentang bobot dan frekuensi efek yang ditimbulkan sehubungan dengan terpajannya makhluk hidup terhadap bahan-bahan tertentu tadi.
2. *Mencari nilai kualitatif* tentang bahaya bahan kimia industri, pencemar lingkungan, dan bahan lain bagi kesehatan (baik makhluk hidup yang terekspos langsung maupun tidak langsung).

Sedangkan *tujuan umumnya* adalah ikut bertanggung jawab dalam pengembangan dan pemanfaatan bahan-bahan kimia (obat, bahan tambahan makanan, pestisida) dan bahan kimia industri sehingga dapat dipakai sebagai standar penilaian guna mencari alternatif bahan yang efektif dengan tingkat toksisitas rendah. Dengan demikian pengetahuan tentang efek toksikan dan mekanismenya dapat digunakan untuk menentukan nilai ambang batas, nilai layak pakai, sekaligus menemukan penawar, dan upaya penanggulangannya.

Aspek-aspek dalam toksikologi yang perlu diperhatikan adalah :

1. *Farmakodinami (atau toksodinami)*, yaitu kerja farmakon atau toksikan pada organisme. Farmakon adalah senyawa yang aktif secara biologik, umumnya senyawa ini cenderung memberikan manfaat positif bagi organisme. Sedangkan toksikan adalah zat yang berefek merugikan atau memiliki resiko relatif besar dalam menimbulkan kerusakan organ dari tubuh organisme.
2. *Farmakokinetik (atau toksokinetik)*, yaitu pengaruh organisme terhadap zat aktif. Zat aktif yang masih asing dan belum dikenal oleh tubuh organisme disebut *xenobiotik*. Kelompok ini terbagi menjadi dua golongan, yaitu golongan *zat eksogen* (misalnya farmakon dan toksikan yang berasal dari luar tubuh) dan golongan *zat*

*endogen* (yakni zat asing yang berasal dari dalam tubuh individu yang kehadirannya dapat mengganggu proses fisiologik atau metabolik tubuh).

Pencemar lingkungan baik di udara, air, maupun tanah merupakan sumber toksikan yang masuk ke dalam tubuh manusia secara insidental. Sedangkan pencemaran yang terjadi di lingkungan industri /pabrik lebih bersifat terbatas karena hanya individu tertentu saja yang terekspos. Sumber, transportasi, degradasi, dan biokonsentrasi bahan pencemar di lingkungan, sangat menentukan terhadap pengaruh yang ditimbulkannya terhadap manusia.

Seiring dengan perkembangan industri, maka tak pelak lagi bahwa makhluk hidup mau tidak mau tidak akan terbebas dari bahan pencemar. Banyak atau sedikit, langsung atau tak langsung, sengaja ataupun tidak, semua organisme akan terekspos oleh bahan pencemar, yang semua itu dapat menimbulkan efek tak terduga pada jaringan tubuh dalam waktu singkat (akut) atau lama (kronis).

Toksikan dapat teradministrasi ke dalam tubuh makhluk hidup melalui dua cara, yaitu :

1. **Langsung**, makhluk hidup kontak langsung dengan toksikan dan menimbulkan efek lokal.
2. **Tidak langsung**, yakni terjadi melalui proses absorpsi via kulit, saluran pencernaan, saluran pernafasan, dan sebagainya. Jumlah kadar yang terserap ke tubuh dalam hal ini sangat tergantung pada dosis yang diberikan, derajat absorpsi, distribusi, pengikatan, dan kemampuan ekskresi via membran sel.

Efek toksik memiliki spektrum yang cukup luas dan dapat dikelompokkan menurut organ sasaran, mekanisme kerja, atau ciri lain.

1. **Efek lokal**. Merupakan efek yang timbul akibat bagian tubuh bersentuhan langsung dengan toksikan. Misalnya: rusaknya permukaan saluran pencernaan sebagai akibat masuknya bahan kaustik, rusaknya kulit karena bersentuhan dengan bahan korosif, atau iritasi akibat gas dan uap yang masuk saluran pernafasan.
2. **Efek sistemik**. Efek timbul setelah toksikan diserap dan terdistribusi ke bagian tubuh yang lain. Toksikan umumnya hanya mempengaruhi organ sasaran. Di dalam organ sasaran itu sendiri terkadang kadar toksikannya tidak begitu tinggi akan tetapi sangat

- mempengaruhi kerja faalnya. Misalnya, konsentrasi DDT atau metil merkuri di otak kurang dari kadar DDT di dalam ginjal atau hati, tetapi daya rusaknya di dalam otak jauh lebih tinggi.
3. *Efek reversibel*. Efek reversibel adalah efek yang dapat hilang dengan sendirinya apabila toksikan telah tereliminasi.
  4. *Efek ireversibel*. Efek yang bertambah parah meskipun ekspos terhadap toksikan telah dihentikan. Misalnya pada kasus karsinoma, sirosis hati, mutasi, kerusakan saraf. Efek ireversibel ini ada yang dapat pulih. Misalnya efek insektisida yang menghambat kerja enzim kolinesterase. Efek tersebut dapat hilang dalam jangka waktu yang sangat lama dan enzim mampu berfungsi kembali. Kasus ini mungkin terjadi jika tubuh terekspos insektisida dalam kadar rendah dan dalam waktu singkat.
  5. *Efek segera*. Efek yang timbul segera setelah sekali ekspos terhadap toksikan. Misalnya ekspos terhadap sianida yang menimbulkan keracunan dalam waktu singkat.
  6. *Efek tertunda*. Efek timbul setelah beberapa waktu ekspos. Sebagai contoh, efek karsinogenik dapat muncul 10 hingga 20 tahun setelah ekspos terhadap bahan karsinogenik.
  7. *Efek morfologis*. Efek yang berkaitan dengan bentuk luar dan struktur mikroskopis pada morfologi jaringan. Efek ini bersifat ireversibel dan berbahaya, misalnya berakibat terjadinya nekrosis, neoplasia, dan sejenisnya.
  8. *Efek fungsional*. Efek ini meliputi efek perubahan fungsi pada organ sasaran yang sifatnya reversibel. Uji mengenai fungsi sangat berguna untuk memantau efek lanjut dari toksikan dalam jangka panjang.
  9. *Efek biokimiawi*. Efek yang timbul tidak tampak atau tidak sampai menimbulkan perubahan secara morfologis, tetapi dapat dideteksi secara khemis. Misal, terjadinya penghambatan enzim tertentu (kolinesterase) akibat ekspos terhadap insektisida organofosfat.
  10. *Efek atau reaksi alergi (hipersensitif)*. Toksikan juga dapat berfungsi sebagai antigen yang merangsang pembentukan antibodi di dalam tubuh. Ekspos berlebihan terhadap toksikan dapat menimbulkan alergi.

### *Respon atau Efek Terhadap Toksikan*

Respon yang timbul terhadap toksikan yang masuk ke dalam tubuh ada beberapa macam, antara lain:

1. *Respon bertingkat*. Yaitu respon yang timbul setelah ekspos terhadap toksikan . Respon tersebut dapat berupa penurunan atau peningkatan berat badan, penurunan/peningkatan konsumsi makanan, penghambatan enzim, dan sebagainya.
2. *Respon kuantal* (kadang ada, atau malah tidak ada sama sekali). Misalnya pada kasus mortalitas, dan pembentukan tumor.

Respon akan meningkat bila dosis toksikan yang diberikan juga tinggi, sedangkan jika dosis toksikannya rendah atau dihentikan maka respon juga cenderung untuk menurun atau berhenti, tetapi efek terhadapnya masih dapat berlanjut.

#### **5.1.Faktor Yang Mempengaruhi Efek Toksik**

Faktor utama yang mempengaruhi efek toksik adalah *dosis* suatu toksikan dan *lamanya terekspos* (terpapar) terhadap toksikan. Sedangkan faktor penunjang terjadinya efek toksik adalah :

1. *Faktor intrinsik*. Merupakan faktor yang berasal dari dalam tubuh individu itu sendiri. Yang termasuk faktor ini adalah spesies atau strain hewan, jenis kelamin, umur, status gizi, hormon.
2. *Faktor ekstrinsik*. Merupakan faktor yang berasal dari luar tubuh, misalnya faktor fisik, lingkungan, atau sosial.

Faktor lain yang perlu dipertimbangkan terhadap timbulnya efek toksik adalah zat kimia (toksikan) lain yang masuk bersamaan atau berurutan dengan toksikan utama, distribusi dan ekskresi, peningkatan atau penurunan biotransformasi, serta kepekaan reseptor pada organ sasaran.

#### **5.2.Faktor intrinsik.**

1. *Spesies (Individu, Strain)* .

Efek toksik antara satu spesies dengan spesies yang lain belum tentu sama. Misalnya:

- ◆ *Pestisida*, jauh lebih toksik bagi hama daripada bagi manusia atau mammalia lain. Sedangkan untuk sesama mammalia, efeknya tidak akan terlalu jauh berbeda.

Perbedaan ini umumnya disebabkan karena perbedaan mekanisme detoksifikasi toksikan. Pada beberapa kasus, penelitian toksikan menggunakan mamalia rendah dapat dipakai sebagai dasar acuan untuk meramalkan efeknya terhadap manusia, tentunya setelah dilakukan konversi terlebih dahulu.

- ◆ Induksi *heksobarbital* pada beberapa spesies mamalia menunjukkan adanya perbedaan lama waktu tidur serta cepat lambatnya mekanisme detoksifikasi.
- ◆ *Etilen glikol* di dalam tubuh akan dimetabolisme menjadi *asam oksalat* yang bersifat toksik. Efek toksiknya terhadap kucing jauh lebih besar dibanding efeknya terhadap tikus. Sedangkan efek terhadap kelinci jauh lebih kecil bila dibanding dengan efek terhadap kucing dan tikus.
- ◆ *Anilin*, merupakan toksikan atau zat kimia yang dapat dimetabolisme menjadi *o-aminofenol* (toksik bagi kucing atau anjing), atau *p-aminofenol* (kurang toksik bagi tikus atau hamster).
- ◆ *2-Naftilamin*. Dapat menimbulkan tumor kandung kemih pada manusia dan anjing, tetapi tidak menimbulkan efek yang sama pada tikus, kelinci, atau marmut.
- ◆ *Rodentisida*, toksik bagi tikus dan rodentia lainnya karena hewan tersebut tidak dapat memuntahkannya bila tertelan. Toksikan ini kurang begitu toksik bagi manusia atau hewan lain yang mampu memuntahkannya keluar.

Pada spesies yang sama, derajat efek toksik yang timbul dapat juga berbeda. Hal ini tergantung pada sensitivitas dan ketahanan tubuh tiap individu. Sebagai contoh, defisiensi glukosa-6-fosfat dehidrogenase dapat menyebabkan anemia darah pada orang yang terekspos dengan primaquin, antipirin, atau sejenisnya

## 2. *Seks, Status hormonal, Kehamilan.*

Pada spesies yang sama, efek toksik dari suatu toksikan cenderung sama. Kalaupun ada perbedaan, rangnya biasanya tidak terlalu jauh. Faktor penyebab perbedaan di dalam spesies yang sama antara lain adalah jenis kelamin, status hormonal, dan kondisi khusus (misalnya dalam keadaan hamil). Sebagai contoh :

- ◆ Efek *barbiturat* menyebabkan tikus betina tidur lebih lama daripada tikus jantan.

Hal ini disebabkan aktivitas enzim-enzim dalam hati tikus jantan lebih tinggi bila dibanding pada tikus betina, sehingga proses detoksifikasi pada tikus jantan cenderung lebih cepat. Pada tikus jantan yang dikebiri, produk estrogennya diketahui meningkat. Hormon ini memperlambat metabolisme barbiturat, sehingga tikus inipun cenderung tidur lebih lama.

- ◆ Efek *insektisida organofosfat* pada tikus serupa dengan efek barbiturat, yakni pada betina dan jantan yang dikebiri jauh lebih peka dibanding dengan pada tikus jantan normal.
- ◆ *Chloroform*, berefek nefrotoksik akut pada tikus jantan daripada tikus betina. Jantan yang dikebiri jauh lebih resisten daripada jantan normal. Pemberian androgen pada betina meningkatkan efek toksik chloroform.

Efek toksikan dapat juga dipengaruhi oleh kondisi hormonal tertentu, misalnya pada kasus hipertiroidisme, hiperinsulinisme, adenalektomi, atau pada stimulasi hipofisis-adrenal. Pada tikus hamil, lebih rentan terhadap aktivitas bahan karsinogenik dan lebih fatal.

### 3. *Umur.*

Neonatus dan hewan yang sangat muda lebih rentan terhadap toksikan, yakni 1,5 hingga 10 kali lipat lebih sensitif. Hal ini disebabkan karena defisiensi sistem enzim detoksifikasi. Sebagai contoh:

- ◆ Pemberian *heksobarbital* 10 mg/kg berat badan berefek tidur selama 360 menit pada mencit usia 1 hari. Sedangkan pada mencit usia 27 hari menyebabkan efek tidur selama 27 menit saja.
- ◆ *Chloramphenicol*, dapat dimetabolisme dengan cepat pada anak umur 1 – 11 tahun (dalam waktu 12 jam), tetapi pada bayi memerlukan waktu 48 jam (dalam waktu 24 jam pertama, diketahui dosis obat/toksikan ini masih relatif tinggi kadarnya dalam darah).

Pada jenis toksikan yang berefek terhadap sistem saraf pusat, organisme yang berumur tua cenderung lebih rentan daripada dengan yang berumur muda. Sebagai contoh, untuk menimbulkan efek DDT yang fatal bagi bayi diperlukan dosis 20 kali

lipat dosis dewasa. Demikian juga dengan Dieldrin, perbedaan dosis antara tua-muda adalah 2 – 10 kali lipat.

Kepekaan reseptor merupakan faktor yang sangat penting. Toksikan Cd atau Pb diabsorpsi oleh bayi 4 – 6 kali lebih banyak dibanding dewasa karena barrier pembuluh darah bayi lebih peka. Penisilin dan tetrasiklin diekskresi lebih lambat oleh bayi, sehingga berefek lebih toksik karena terlalu lama di dalam tubuh.

Usia tua cenderung lebih sensitif terhadap bahan kimia tertentu. Ini merupakan salah satu akibat dari berkurangnya mekanisme detoksifikasi hati, menurunnya fungsi ekskresi ginjal, berkurangnya jumlah cairan tubuh (sehingga toksikan menjadi lebih pekat), dan meningkatnya lemak tubuh.

#### *4. Status gizi.*

Pengurangan jumlah makanan yang masuk ke dalam tubuh dapat memperkecil kejadian tumor. Contoh, pengurangan makanan berprotein tinggi dapat menurunkan derajat tumorigenesis terhadap aflatoxin B. Diet yang kaya lemak merangsang terjadinya tumor. Defisiensi vitamin A dapat mengurangi ketahanan tubuh terhadap bahan karsinogen inhalasi (toksikan yang dapat masuk tubuh via saluran pernafasan).

#### *5. Penyakit.*

- ◆ Hati merupakan organ utama biotransformasi zat-zat kimia. Jika hati terkena hepatitis akut/kronis, sirosis, nekrosis, maka kemampuan biotransformasi juga akan menurun.
- ◆ Penyakit ginjal dapat mengacaukan fungsi ekskresi dan metabolik, sehingga toksikan tidak tersaring dengan baik dan dapat kembali beredar ke seluruh tubuh.. Hal semacam ini dapat menimbulkan akumulasi toksikan dalam tubuh sehingga menambah toksik.
- ◆ Penyakit jantung, mengganggu mekanisme peredaran darah ke hati dan ginjal sehingga metabolisme dan ekskresi menjadi terganggu.
- ◆ Penyakit saluran nafas, menyebabkan penderita lebih rentan terhadap toksikan SO<sub>2</sub>.

### **5.3.Faktor Ekstrinsik.**

#### **1. Faktor Fisik.**

Perubahan suhu dapat mengubah toksisitas suatu toksikan, dan mempercepat respon. Efek ini berkaitan dengan reaksi biokimia, yakni semakin meningkat suhunya maka proses metabolisme dan biotransformasi semakin cepat. Misalnya, toksisitas colchicine pada katak akan meningkat pada suhu yang tinggi.

Perubahan tekanan barometrik (tinggi tempat) dapat mengubah efek toksik karena menurunnya suplai oksigen. Toksisitas amphetamine bertambah besar pada ketinggian yang bertambah atau pada terbatasnya suplai oksigen.

Efek penyinaran atau radiasi dapat meningkatkan toksisitas perangsang SSP (susunan saraf pusat). Pada uji gelap terang, terbukti bahwa mencit lebih peka terhadap toksikan pada saat awal fase gelap.

#### **2. Faktor Sosial atau lingkungan.**

Faktor sosial atau lingkungan tertentu ikut menentukan daya toksik toksikan. Misalnya di area peternakan, Toksisitas suatu toksikan dapat berubah sesuai dengan cara penanganan terhadap hewan ternak, cara pengandangan (individual atau kelompok), jenis sangkar, bahan alas tidur, dan sanitasinya.

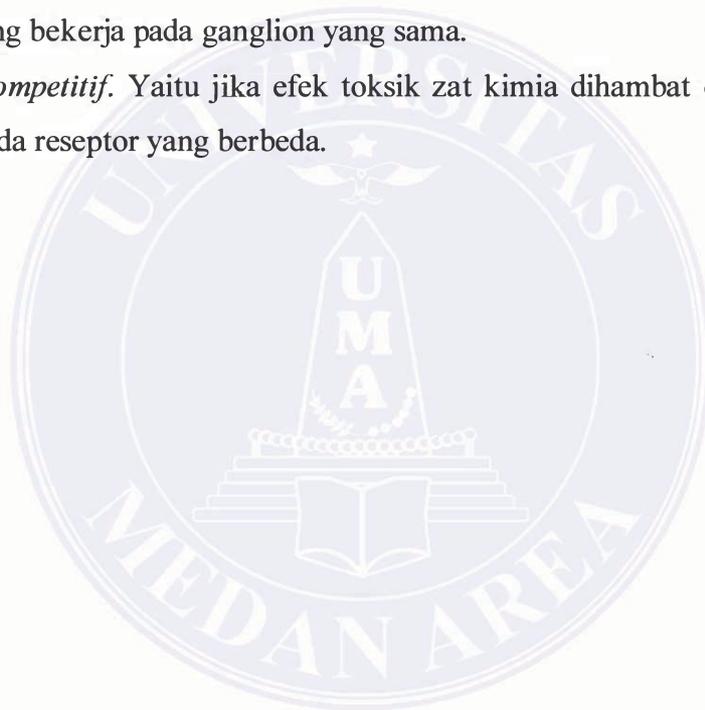
### **5.4.Jenis Interaksi**

Toksisitas dapat meningkat atau berkurang bila organisme terekspos dengan bahan kimia secara serentak atau berurutan. Jenis interaksi toksikan dapat bersifat sebagai berikut :

1. *Aditif*. Yaitu jika efek gabungan lebih dari satu toksikan sama dengan besarnya efek yang ditimbulkan oleh tiap toksikan bila diberikan secara sendiri-sendiri. Misalnya, pengaruh kombinasi pestisida organofosfat.
2. *Sinergistik*. Yaitu jika efek gabungan dua atau lebih toksikan menjadi lebih besar daya toksiknya bila dibanding dengan pemberian secara sendiri-sendiri. Sebagai contoh, pengaruh asbes dan merokok terhadap paru-paru menyebabkan kemungkinan terkena penyakit paru-paru meningkat sebesar 55 kali lipat.
3. *Potensiasi*. Yaitu jika salah satu bahan toksikan diberikan secara sendiri-sendiri tidak

akan menimbulkan efek toksik, tetapi ketika digabung menjadi sangat toksik. Contohnya, isopropanol yang sebenarnya adalah non-toksik, tetapi menjadi sangat toksik bila diberikan bersamaan dengan CCl<sub>4</sub>.

4. *Antagonisme kimia*, Yaitu jika ekspos terhadap salah satu bahan kimia menyebabkan berkurangnya toksisitas bahan/ zat kimia lain. Misalnya, hadirnya dimerkaptol justru akan menurunkan tingkat toksisitas logam berat.
5. *Antagonisme fungsional*. Yaitu jika dua zat kimia atau toksikan menghasilkan efek sebaliknya pada sistem kerjanya. Misalnya perangsang SSP menjadi depresan SSP.
6. *Antagonisme bersaing*. Yaitu jika zat agonis dan antagonis bekerja pada reseptor yang sama. Misalnya pada terapi penghambatan efek nikotin dengan cara memberikan zat penghambat lain yang bekerja pada ganglion yang sama.
7. *Antagonisme non-kompetitif*. Yaitu jika efek toksik zat kimia dihambat oleh bahan lain yang bekerja pada reseptor yang berbeda.



## **BAB VI. PRINSIP BIOASSAY**

Metode yang dikembangkan untuk melakukan uji toksisitas lingkungan adalah metode bioassay (dikenal dengan Metode Rand). Metode ini diharapkan dapat memberikan hasil sesuai harapan yakni mendapatkan informasi sebanyak mungkin tentang efek toksik suatu polutan terhadap segala jenis organisme sehingga dapat diketahui seberapa bahaya kehadiran polutan tersebut terhadap lingkungannya.

### **6.1. Kriteria Dasar Bioassay.**

Prinsip pelaksanaan prosedur bioassay ini harus didasarkan pada kriteria-kriteria berikut ini:

1. Agar polutan dapat menunjukkan segala kemungkinan efek yang diakibatkannya, maka polutan harus kontak langsung atau bereaksi dengan sebagian dari organisme yang ada di lingkungan dimana polutan itu berada dalam keadaan yang dapat dikontrol. Efek yang timbul dapat berupa perubahan struktur dan /atau fungsi dari suatu sistem lingkungan.
2. Pada setiap jenis polutan harus diketahui besarnya konsentrasi minimum yang tidak menimbulkan efek dan konsentrasi maksimum yang bakal menimbulkan efek terhadap seluruh sistem dalam lingkungan. Diantara kedua konsentrasi tersebut harus dapat dicari range konsentrasi optimum yang hanya menimbulkan efek terhadap sebagian dari sistem biologik (subsistem) lingkungan.
3. Secara umum, sel dan jaringan yang memiliki fungsi sama pada spesies yang berbeda juga harus mengalami efek yang serupa dari polutan yang sama.
4. Perubahan struktur polutan sebagai akibat dari metabolisme atau transformasi di lingkungannya diduga akan mempengaruhi aktivitas dan cara kerja polutan tersebut di lingkungannya.

Prinsip bioassay tersebut adalah prinsip yang ideal untuk diterapkan pada organisme non-mammalia (misalnya ikan, avertebrata) yang hidup pada medium cair, sehingga akurasi efek polutan terhadap organisme dapat diketahui lebih teliti lagi.

Tahapan uji bioassay ini sebenarnya ada lima, yakni mulai tahap awal berupa pengumpulan informasi hingga tahap rancangan percobaan:

1. *Pengetahuan karakter kimiawi, fisik, dan biologik dari polutan.* Informasi mendetail tentang polutan yang akan diujikan (baik tertulis dalam teksbook/laporan, atau tak tertulis) sebaiknya sudah dihimpun sebelumnya. Bekal ini perlu untuk akurasi data penelitian, dan keamanan kerja, serta target sasaran yang diharapkan.
2. *Praduga atau dugaan awal terhadap dampak yang akan ditimbulkan oleh polutan.* Berdasar pengetahuan yang ada sebelumnya, maka besarnya dampak sudah harus diperkirakan sebelumnya. Sehingga perlu tidaknya dilakukan pengaturan (regulasi) lingkungan terhadap efek toksik polutan dapat dipersiapkan.
3. *Uji bioassay jangka pendek (Short-term or Acute Bioassays).* Bioassay ini dilakukan dalam kurun waktu tertentu, misalnya 24-96 jam, guna melihat efek jangka pendek terhadap keberadaan suatu polutan di lingkungan. Ada dan tidaknya efek yang ditimbulkan berujung pada regulasi lingkungan.
4. *Uji bioassay jangka panjang (Long-term or Chronic Bioassays).* Bioassay ini dilakukan dalam hitungan minggu, bulan atau tahun, atau minimal sepertiga waktu hidup organisme uji dan maksimal adalah seumur hidup. Data yang diharapkan adalah data lengkap dari efek yang ditimbulkan oleh polutan terhadap struktur, fungsi dan mekanisme interaksi polutan dengan tubuh organisme.
5. *Uji bioassay terhadap berbagai spesies sekaligus* guna mengetahui perbedaan atau persamaan efek yang ditimbulkan oleh suatu polutan dalam waktu yang bersamaan.

## **6.2. Terminologi Toksisitas/Bioassay.**

Untuk memahami lebih jauh mengenai uji toksisitas secara bioassay, diperlukan pengetahuan mengenai terminologi dasar yang penting guna menghindari salah pengertian, mengingat begitu banyaknya terminologi yang diperkenalkan dalam dunia toksikologi. Keseragaman istilah yang dimaksud antara lain adalah :

1. *Akut (acute).* Respon cepat dan merugikan yang ditimbulkan oleh suatu stimulan (polutan). Respon umumnya muncul setelah 4 hari kontak (untuk ikan dan organisme akuatik), atau 24 jam – 2 minggu (untuk mammalia). Bioassay akut biasanya berupa

- uji mortalitas guna mendeteksi suatu polutan yang potensial menimbulkan kematian dalam waktu relatif singkat.
2. *Subakut (Subacute)*. Respon yang timbul tidak seberat pada respon akut, dan muncul setelah beberapa waktu ekspos. Respon ini bisa menjadi respon kronik.
  3. *Kronik (Chronic)*. Suatu respon terhadap hadirnya polutan dalam jangka waktu yang lama dan kontinyu. Pada bioassay kronik terhadap organisme akuatik, organisme uji biasanya diekspos selama hidup (minimal 1/10 lifespan) untuk mengetahui efek polutan terhadap pola pertumbuhan, reproduksi, dan perkembangannya. Sedangkan bioassay untuk mammalia, organisme uji diekspos selama satu atau beberapa tahun untuk mendeteksi efek sejenis dan juga efek karsinogenik. Organisme yang diuji dapat bersifat lethal atau sublethal.
  4. *Kematian (lethal)*. Polutan berada dalam konsentrasi yang sangat mematikan ketika kontak langsung dengan organisme uji. Tanda letalitas meliputi: tidak ada gerakan dan tidak ada reaksi terhadap sentuhan yang halus. Perhitungan letalitas/mortalitas dilakukan per 24 jam.
  5. *Sublethal*. Polutan berada pada konsentrasi setingkat dibawah kadar mematikan.
  6. *Bioassay akuatik*. Uji toksisitas yang menggunakan organisme akuatik untuk mengevaluasi efek polutan toksik atau efek faktor lingkungan (pH, DO, Suhu, dan sejenisnya). Uji ini dapat juga dimaksudkan untuk
    - a). menguji apakah kondisi lingkungan cocok dengan kehidupan akuatik,
    - b). apakah derajat atau konsentrasi faktor lingkungan sesuai bagi kehidupan akuatik,
    - c). efek dari faktor lingkungan terhadap derajat toksisitas suatu senyawa tertentu,
    - d). toksisitas relatif dari polutan yang berbeda terhadap satu atau lebih spesies,
    - e). kepekaan relatif suatu organisme uji terhadap polutan,
    - f). mengetahui tahapan-tahapan perlakuan limbah yang diperlukan agar limbahnya sesuai dengan batasan pencemaran efluen yang diijinkan (terlebih jika mengandung senyawa toksik),
    - g). kualitas air yang baik untuk mendukung kehidupan akuatik,
    - h). konsentrasi yang aman bagi segala jenis toksikan,
    - i). Melakukan perbandingan dengan standar kualitas air.

7. *LD<sub>50</sub> (Lethal Dosage 50)*. Dosis letal median yang menyebabkan 50% organisme uji mengalami kematian dalam waktu tertentu. Perhitungan LD<sub>50</sub> ini kurang tepat jika diterapkan pada organisme akuatik, karena dosis ini identik dengan perlakuan secara oral atau injeksi dari suatu obat atau toksikan padat lainnya. Juga tidak berlaku terhadap padatan/butiran yang ditebar langsung ke medium air.
8. *LC<sub>50</sub> (Lethal Concentration 50)*. Konsentrasi letal median atau kadar substansi toksik di sekitar perairan yang mengakibatkan 50% kematian organisme akuatik yang diujikan dalam waktu tertentu.
9. *EC<sub>50</sub> (Effective Concentration 50)*. Konsentrasi efektif suatu polutan yang menimbulkan efek sublethal berupa perubahan tingkah laku atau respon fisiologis terhadap 50% organisme uji.
10. *ED<sub>50</sub> (Effective Dosage 50)*. Dosis efektif suatu obat atau substansi toksik yang menimbulkan perubahan tingkah laku atau respon fisiologis dari 50% organisme uji.
11. *TL<sub>50</sub> (Tolerance Limit 50) atau TLM (Tolerance Limit Median)*. Batas toleransi median atau konsentrasi dimana 50% organisme uji masih dapat bertahan hidup.
12. *Incipient LC<sub>50</sub>*. Konsentrasi letal yang menyebabkan 50% organisme uji mengalami kematian, dan 50% sisanya dapat meneruskan kehidupannya tanpa waktu yang dibatasi.
13. *SC (Safe Concentration)*. Batas konsentrasi maksimum suatu toksikan berbahaya yang dilepaskan ke medium namun tidak sampai menimbulkan kerugian bagi organisme meskipun terekspos dalam waktu lama (minimal satu generasi). Organisme uji harus sangat sensitif, sementara toksikan dapat didistribusikan ke segala bentuk medium air dengan “aman”. Ukuran ini dipergunakan untuk membakukan nilai pada penentuan kualitas air.
14. *MATC (Maximum Allowable Toxicant Concentration)*. Konsentrasi substansi toksik yang diperbolehkan ada pada badan air penerima polutan tanpa menimbulkan efek yang berarti bagi organisme akuatik.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dari beberapa terminologi diatas adalah bahwa LC dan LD lebih ditujukan untuk menentukan tingkat kematian (letalitas) 50% organisme uji. Perhitungan ini paling umum digunakan untuk uji toksisitas akut. Sedangkan EC dan

ED lebih ditujukan untuk pengamatan efek sublethal. Efek dari suatu substansi toksik di lingkungan sebenarnya sangat tergantung pada dosis/konsentrasi dan lamanya pajanan/ekspos. Oleh karena itu, waktu ekspos harus selalu dicantumkan, sehingga *ekspresi dari bioassay akut ini dilambangkan dengan LC<sub>50-24 jam</sub>, atau LD<sub>50-96 jam</sub>, atau TL<sub>50-96 jam</sub>*. Hasil pengamatan selalu disajikan dalam bentuk persen. Efek 50% adalah efek yang paling reproduibel, sedangkan waktu 96 jam adalah waktu yang paling responsibel dan mudah. Sebagai contoh : LC<sub>50-96jam</sub> dari toksikan limbah tekstil adalah 20%, yang berarti bahwa pada pemberian kadar 20% limbah tekstil telah menimbulkan respon berupa kematian hingga 50% organisme uji.

Untuk pengamatan MATC, organisme ujinya harus yang berada pada tahap perkembangan paling sensitif, misalnya tahap telur atau larva serangga, sehingga efek toksikan dapat maksimum dan pengamatan dapat berlangsung relatif singkat (mungkin hanya perlu beberapa hari/minggu, tanpa harus menunggu keseluruhan lifespan organisme uji), tetapi bisa mendapatkan informasi menyeluruh. Tentunya, pengamatan MATC harus lengkap, mulai dari uji fisiologis, biokimia, tingkah laku, histopathologis, dan sebagainya. Sehingga nilai akhir yang didapat betul-betul akurat. Untuk mengetahui kaitan antara MATC dengan LC<sub>50-96jam</sub>, kita harus memperhitungkan nilai AF (*Application Factors*) terlebih dahulu. AF didapat dari seberapa banyak kita pernah meneliti tahap demi tahap pada kehidupan organisme uji. Misalnya nyamuk, tahapan metamorfosisnya meliputi telur, larva, kepompong, nyamuk (berarti 4 tahap), maka nilai AF adalah ¼ per tahapnya. Jadi nilai MATC per tahap haruslah setara dengan ¼ x nilai LC<sub>50-96jam</sub>.

Pada pengujian toksisitas akut, kita dapat melakukannya dengan dua cara yakni :

1. *Uji secara statik*. Biasanya dilakukan di laboratorium, menggunakan bahan toksikan dasar (T/time = 96 jam) atau bahan polutan (T= 48-96 jam). Sebaiknya dilengkapi dengan aerasi mekanik.
2. *Uji secara mengalir*. Uji ini dilakukan di lapangan (in situ) menggunakan polutan, dengan waktu uji 96 jam. Atau dapat juga dilakukan di laboratorium menggunakan bahan toksikan dasar, dengan waktu uji 96-192 jam.

### **6.3. Parameter Efek Subletal.**

Parameter-parameter efek subletal bahan pencemar terhadap organisme uji akuatik (misalnya ikan) umumnya didasarkan pada metode pendekatan yang dibedakan menjadi 3 konsep, yakni:

1. *Konsep Mount-Stephan.* Konsep ini mempelajari mengenai perubahan sifat biologik yang penting, misalnya :
  - a. Pola serta kecepatan pertumbuhan.
  - b. Cara makan
  - c. Maturasi
  - d. Kemampuan fertilisasi serta perkembangan telur
  - e. Kelangsungan hidup anak ikan (atau instar serangga).
2. *Konsep Mitrovic.* Mempelajari perubahan-perubahan pathomorfologik yang meliputi semua perubahan menyangkut morfologi ikan mulai dari bentuk eksternal (perubahan mikroskopik squama, mata keruh, perdarahan insang), kerusakan histologik organ (diskolorasi, produksi mukus meningkat), sampai ke tingkat perubahan seluler (hyperplasia, degenerasi sel).
3. *Konsep umum.* Mempelajari gangguan fungsi (studi pathofisiologik) dengan metode fisiologik dan biokimia, misalnya uji hematologik (hemorrhagia), pengukuran derajat metabolik, studi aktivitas enzimatik dan imunobiologik, atau pengamatan tingkah laku (hilangnya keseimbangan, kanibalisme).

## **BAB VII. BIODEGRADASI**

Bahan organik dikatakan biodegradabel bila bahan tersebut siap untuk diuraikan oleh mikroorganisme terutama dari golongan bakteri, fungi, protozoa. Daerah yang tercemar berat dan sedang dalam proses dekomposisi biasanya dicirikan dengan kehadiran fungi berwarna putih, kuning, merah, atau coklat. Limbah organik dalam hal ini justru digunakan sebagai suplai makanan bagi dekomposer, terutama untuk pertumbuhan sehingga area yang tercemar bahan organik justru merupakan tempat boomingnya pertumbuhan dekomposer.

Menurut peta area biodegradasi pada badan air yang tercemar limbah, maka zone biodegradasi dapat dibagi menjadi 4 :

1. *Zona degradasi (Zone of Degradation).*

Daerah ini merupakan daerah titik poin efluen yang mengandung bahan pencemar terbanyak, dan sekaligus merupakan area awal terjadinya proses degradasi limbah organik dan anorganik. DO dapat turun hingga 40% atau bahkan mencapai titik nol (pada puncak dekomposisi). Air tampak kotor, keruh, bau, penetrasi cahaya terganggu, biota air yang kecil (algae, mikroorganisme) mulai menghilang karena berkurangnya oksigen. Pada zona ini juga akan terbentuk deposit limbah yang tersedimentasi.

2. *Zona dekomposisi aktif (Zone of Active decomposition).*

Di area ini DO akan terus turun jika pencemaran berlangsung kontinyu, tetapi jika pencemaran bersifat temporer, maka DO akan kembali meningkat secara perlahan dari 0% ke 40%. Biota air mati karena kondisi perairan yang toksik oleh gas-gas beracun yang diproduksi secara aktif oleh dekomposer anaerob. Gas beracun kadang juga menimbulkan buih sehingga menghambat proses reoksigenasi perairan.

3. *Zone pemulihan (Zone of Recovery/ Zone of Rehabilitation).*

DO pada zone ini mulai meningkat, bahkan dapat mencapai diatas 40%. Kekeruhan berkurang, jamur menghilang, dan algae mulai muncul. Unsur C, N, S dan P mulai tersedia sehingga kehidupan makroskopik mulai tumbuh.

4. *Zona penjernihan (Zone of Cleaner Water).*

Merupakan fase terakhir dari proses dekomposisi, ditandai dengan meningkatnya DO hingga jenuh atau maksimal karena mekanisme biogeokimia mulai normal.

Pada tabel berikut ini termuat ciri biologik pada 4 area yang sedang dalam proses pemulihan ke kondisi awal setelah terkena pencemaran:

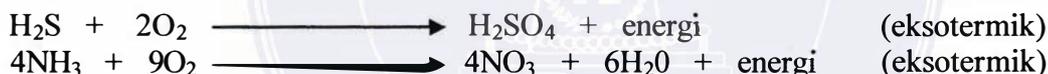
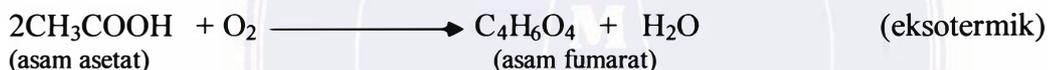
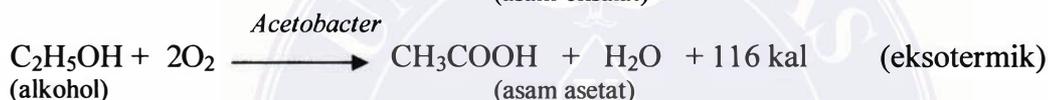
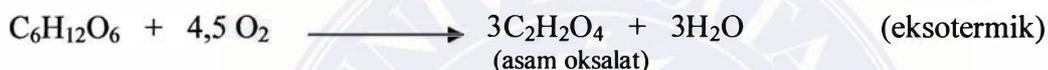
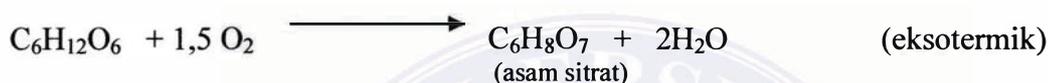
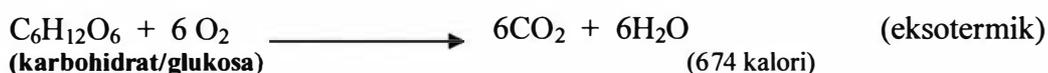
| ZONA                 | CIRI KEHIDUPAN YANG ADA  |
|----------------------|--|
| DEGRADASI            | <ul style="list-style-type: none"><li>- Jumlah ikan dan algae menurun (pertumbuhan terhambat)</li><li>- Ganggang biru dan ganggang biru-hijau (<i>Stigeoclonium</i>, <i>Oscillatoria</i> dan <i>Ulothrix</i>) di pinggiran badan air atau di bebatuan mulai migrasi.</li><li>- Cacing merah (<i>Tubifex</i> dan <i>Limnodrilus</i>) tumbuh didasar lumpur.</li><li>- Jamur air yang tipis berwarna putih, coklat, abu-abu atau hijau mulai nampak.</li><li>- Protozoa/Ciliata (<i>Carchesium</i>, <i>Epistylis</i>, <i>Vorticella</i>) mulai nampak.</li></ul> |
| ACTIVE DECOMPOSITION | <ul style="list-style-type: none"><li>- Bakteri flora dan bakteri anaerob mengganti peranan bakteri aerob.</li><li>- Protozoa dan jamur berkurang, tetapi dapat tumbuh kembali.</li><li>- Algae muncul di dasar perairan.</li><li>- <i>Tubifex</i> muncul di permukaan dan dasar perairan</li></ul>  |
| RECOVERY             | <ul style="list-style-type: none"><li>- Protozoa, dekomposer dan crustacea mulai muncul.</li><li>- Fungi muncul sedikit demi sedikit.</li><li>- Algae (<i>Cyanophyceae</i>, <i>Chlorophyceae</i>, <i>Diatomae</i>) tumbuh dengan baik.</li><li>- Sponges, Bryozoa mulai bermunculan, begitu juga dengan Kepah, Siput dan larva insekta, zooplankton, Cladocera, Copepoda, Isopoda.</li><li>- Cyprinidae, Hirudinae, dan ikan yang adaptif mulai berdatangan.</li></ul>   |
| CLEANER WATER        | <ul style="list-style-type: none"><li>- Keadaan mulai pulih dengan ditandai hilir mudiknya ikan dengan tenang dan mulai bermunculan biota lain serta tumbuhan air.</li></ul>   |

Keempat fase atau zona tersebut hanya berlaku apabila pembuangan limbah tidak berlangsung secara kontinyu, melainkan periodik yang lamban atau hanya sekali buang ke perairan. Yang umum terjadi adalah, limbah dibuang secara kontinyu dengan frekuensi tinggi, sehingga terjadi efek akumulatif dan additif. Keadaan ini sangat tidak mendukung proses *homeostasis* dan *self purification* oleh badan air penerima limbah. Maka yang umum terlihat adalah pencemaran dengan segala efek samping yang sama sekali tidak menyenangkan atau bahkan cenderung merugikan dan merusak badan air atau lingkungan itu secara keseluruhan.

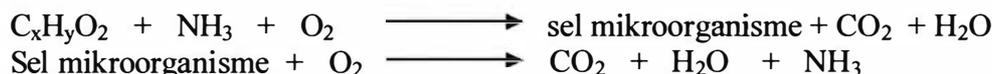
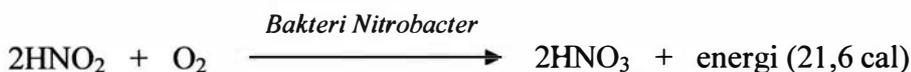
Proses penguraian limbah organik itu sendiri dapat berlangsung secara aerob maupun anaerob. Dekomposer yang hidup secara *aerob* (*Eumycetes, Algae, Protozoa, Metazoa*) akan mengubah 80-90% limbah organik:

1. Karbohidrat C dan phenol menjadi asam, CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.
2. Senyawa N organik menjadi CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, dan NH<sub>3</sub>.
3. Senyawa S organik menjadi sulfida atau SO<sub>4</sub><sup>=</sup>
4. Senyawa P organik menjadi fosfat atau PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>

Contoh prosesnya adalah sebagai berikut :



Proses aerob berikut ini sebenarnya lebih banyak berlangsung di dalam tanah atau pada media lumpur (primary sludge atau activated sludge).

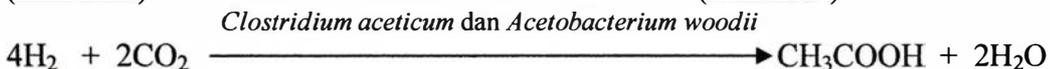
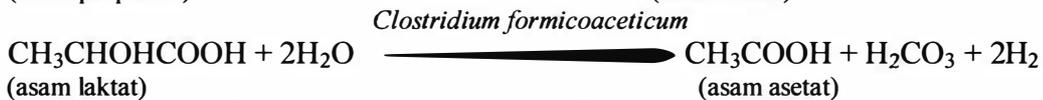
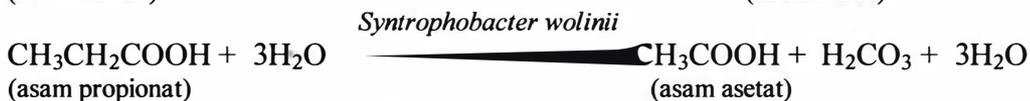
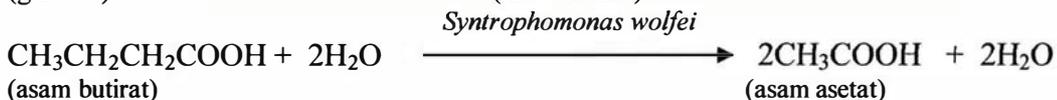
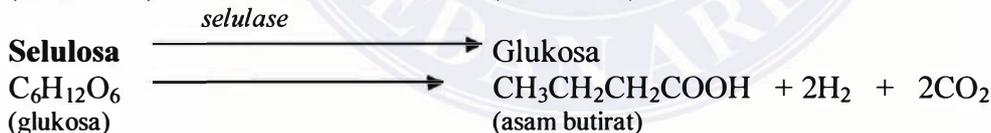
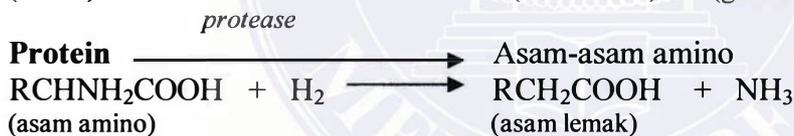
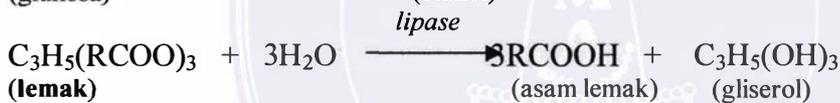
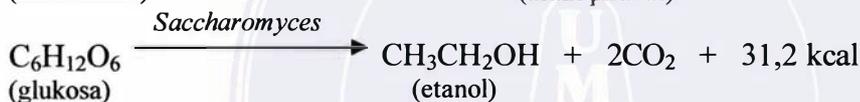
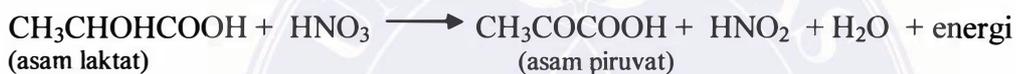
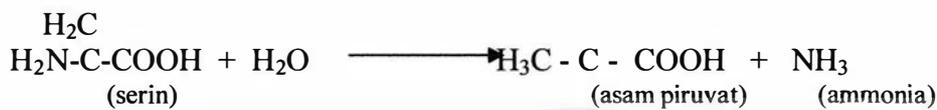


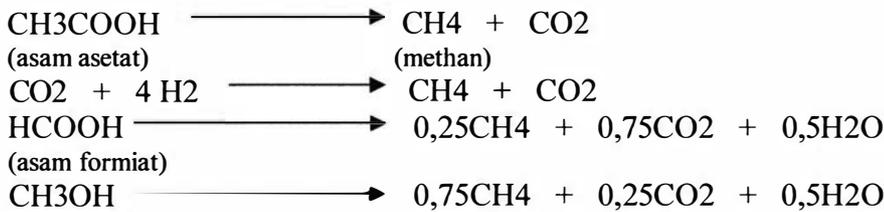
Semua proses ini memerlukan oksigen, sehingga DO perairan akan menurun dan BOD menjadi meningkat. Selain itu, kebanyakan reaksi berlangsung secara eksotermik, sehingga suhu perairan secara perlahan akan meningkat. Proses aerob secara buatan dapat

juga dilakukan, terutama pada pengolahan limbah organik secara *lumpur aktif* (activated sludge), *kolam oksidasi*, *trickling filter*, dan *rotary disc*.

Mikroorganisme *anaerob* bekerja di perairan yang tercemar berat, yakni mengubah komponen berikut ini secara fermentatif:

1. Karbohidrat C menjadi metan (CH<sub>4</sub>).
2. Senyawa S organik menjadi sulfat dan sulfida.
3. Senyawa P organik menjadi phosphine dan komponen fosfor.
4. Senyawa N organik menjadi nitrat dan ammonia.





Selain faktor jenis dan banyaknya mikroorganisme, kemampuan biodegradasi juga dipengaruhi oleh komponen-komponen yang terkandung dalam bahan pencemar, misalnya ;

1. *Adanya kandungan toksikan* (misalnya logam berat, sianida, sulfida) menyebabkan terbunuhnya mikroorganisme aerob meskipun DO yang tersedia cukup tinggi. Efeknya; proses biodegradasi menjadi terhambat.
2. *Adanya lapisan minyak* di permukaan air (misalnya akibat tumpahan minyak dari kapal tanker), menyebabkan menurunnya kemampuan diffusi oksigen di permukaan air, sehingga DO menurun. Keadaan ini menyebabkan kehidupan mikroorganisme aerob terganggu dan biodegradasi menjadi lambat.
3. *Adanya deterjen keras* yang menciptakan busa, mengakibatkan terhambatnya proses reoksigenasi perairan sehingga menciptakan kondisi anaerob.
4. *Adanya kandungan bahan organik yang bervariasi* (misalnya selulosa, karbohidrat, lemak, lignin) mempengaruhi cepat-lambatnya waktu biodegradasi. Bahan organik segar cenderung menyebabkan immobilisasi N dan reduksi tanah.

Faktor pendukung yang lain seperti kelembaban, aerasi, unsur hara, jumlah unsur C dan N, ukuran materi, aktivator (hanya diperlukan jika jumlah mikroorganisme sedikit) dan jumlah bahan organik akan mempengaruhi kecepatan proses dekomposisi.

Proses biodegradasi sebenarnya berlangsung secara alami dan kontinyu di semua badan air/tanah, selama faktor yang terkait saling mendukung. Agar proses biodegradasi dapat berlangsung relatif cepat, maka sistem “simba” perlu diterapkan. *Sistem simba* adalah sistem simbiosis bersama antara dua kehidupan atau lebih selama berlangsungnya proses dekomposisi. Keunggulan sistem ini adalah: waktu relatif singkat, hasil samping yang membahayakan bagi kelompok jasad lain dapat segera tereliminasi/termanfaatkan, efisiensi dapat ditingkatkan, stabilitas penggunaan substrat lebih baik dibanding sistem tunggal. Contoh yang sering digunakan untuk sistem simba adalah inokulan

mikroorganisme *EM4* (*Effective Microorganisms 4*; juga disebut *Anaerobic Zymogenic Microorganisms*), yakni kultur campuran antara *Lactobacillus*, *Ragi* (kumpulan organisme bersel tunggal; fermentor gula menjadi alkohol), *Bakteri fotosintetik*, *Actinomycetes* dan *Jamur pengurai selulosa*. *EM4* merupakan aktivator, yakni mikroorganisme yang sengaja ditambahkan pada bahan organik untuk membantu percepatan dekomposisi. Dalam penggunaannya, inokulan *EM4* perlu dicampur dengan gula (sebagai substrat awal bagi pertumbuhan ragi) dan dilarutkan dalam air sebelum disiramkan ke bahan organik. 90% komponen mikroorganisme *EM4* ini dapat mengubah bahan organik limbah menjadi asam laktat secara anaerob/ fakultatif anaerob tanpa menimbulkan panas yang tinggi (perubahan berlangsung secara enzimatis), tidak menghasilkan gas beracun (sehingga tak merusak akar tanaman), dan tanah menjadi bersifat zymogenik. Hal ini merupakan proses yang sangat menguntungkan dalam menjaga keseimbangan siklus biogeokimia di ekosistem perairan/lumpur/tanah.

Proses dekomposisi (atau secara umum juga dikenal dengan istilah proses pengomposan), berlangsung dalam 4 tahap, yakni:

1. *Tahap mesofilik*. Merupakan tahap permulaan, dimana media mempunyai nilai pH dan temperatur yang sesuai dengan bahan organik di lingkungan. Seiring dengan aktivitas mikroorganisme dalam penguraian substrat, temperatur mulai naik dan asam organik mulai banyak diproduksi. Kondisi ini menyebabkan pH medium menurun.
2. *Tahap termofilik*. Kenaikan temperatur dapat mencapai di atas 40°C. Aktivitas mikrobia mesofilik terhenti, kemudian peranannya digantikan oleh mikroorganisme termofilik. Bersamaan dengan penggantian ini, maka ammonia dan nitrogen akan dihasilkan sehingga akan menaikkan kembali nilai pH.
3. *Tahap pendinginan*. Jika temperatur maksimum sudah dicapai maka hampir seluruh kehidupan mikroorganisme mengalami kematian. Kondisi ini menyebabkan temperature akan menurun perlahan hingga mencapai ke titik suhu semula.
4. *Tahap masak*. Ini merupakan tahap selesainya proses dekomposisi. Hasilnya berupa hara (humus/kompos) yang siap di keringangkan untuk digunakan, atau dimanfaatkan langsung untuk pertumbuhan suksesi sekunder berikutnya.

Jika polutan masuk ke dalam badan air tertentu, jelas keseimbangan ekologis badan air tersebut akan terganggu. Sebagai konsekuensinya, mulai dari titik poin

pencemar itu masuk ke badan air hingga ke hilirnya akan menyebabkan tingkat biodegradasi meningkat dengan akibat lebih lanjut adalah penurunan DO. Seberapa jauh prosentase peningkatan biodegradasi dan penurunan DO sangat tergantung kepada volume dan jenis material organik yang mencemari badan air tersebut. Sebagai gambaran dapat kita umpamakan sebagai berikut :

1. Jika jumlah limbahnya sedikit (derajat pencemaran ringan), penurunan DO yang terjadi dapat segera diperbaiki dengan cara reoksigenasi permukaan perairan. Dengan demikian perubahan ekosistem perairan tadi hanya berlangsung untuk sementara waktu saja, dan proses biodegradasi dapat berlangsung relatif singkat.
2. Jika volume limbah besar (derajat pencemaran sedang), ada kemungkinan menimbulkan efek aditif atau sinergis terhadap limbah yang telah ada sebelumnya. Konsekuensinya, limbah terdahulu belum terolah habis disusul dengan kehadiran limbah berikutnya, maka ekosistem perairan dapat mengalami perubahan yang cenderung merusak, bersifat permanen atau kronik. DO dapat menurun drastis dalam waktu singkat hingga pada titik terendah. Biota air dapat mengalami perubahan kompleks dan bervariasi tergantung kemampuan tiap spesies untuk beradaptasi terhadap perubahan yang terjadi. Di sekitar titik utama pembuangan limbah organik, populasi bakteri (mikroorganisme limbah) akan tumbuh dengan cepat. Ini akan diikuti dengan pertumbuhan Protozoa pemakan bakteri. Namun disisi lain, penurunan DO menyebabkan populasi algae dan fauna air ikut menurun. Hanya beberapa jenis invertebrata saja yang sanggup bertahan hidup pada keadaan oksigen yang terbatas. Misalnya cacing lumpur (*Tubificidae*) dan cacing penghisap darah (*Chironomus*) . Pada saat DO berada pada titik minimum, proses biodegradasi sebenarnya justru berada dalam puncaknya. Semakin ke hilir, limbah sebenarnya sudah banyak mengalami pengenceran (baik oleh penambahan volume air, hujan, atau reoksigenasi). Proses recovery (pemulihan keadaan) perlahan-lahan berlangsung mulai dari hilir menuju ke hulu. Jika sumber limbah organik mulai berkurang karena terdegradasi, maka perlahan populasi decomposer juga akan menurun. Keadaan ini mengindikasikan adanya perbaikan kualitas air. Proses biodegradasi itu sendiri menghasilkan garam-garam anorganik seperti nitrat dan fosfat yang secara perlahan akan memacu pertumbuhan algae dan protozoa. Sementara itu, reoksigenasi

yang berlangsung terus menerus akan memberikan peningkatan DO sehingga lambat laun biota air dapat tumbuh kembali.

3. Jika derajat pencemarannya berat atau sangat berat, proses seperti pada contoh dua mungkin saja terjadi namun waktu yang diperlukan sangat lama. Dan efek yang ditimbulkannya (radius pencemaran) dapat mencapai lebih dari 65 km dari titik poin efluen. Kemungkinan terburuk adalah matinya badan air yang tercemar.

Secara umum, efek dari pencemaran air sudah dapat diketahui dengan jelas. Namun pengolahan polutan (proses self purification atau biodegradasi) di tiap badan air penerima polutan bervariasi antara satu tempat dengan tempat lainnya. Hal ini sangat tergantung kepada faktor khemis (jumlah dan komposisi limbah organik), faktor fisik (volume air, aliran air, cuaca), dan faktor biologis (biota dan dekomposer) yang tersedia di badan air tersebut. Proses self purification, homeostasis, dan kelancaran siklus biogeokimia menjadi tak terpisahkan.

Jika limbah yang dibuang sama sekali belum melewati UPL (unit pengolahan limbah) atau hanya sebagian limbah saja yang diolah, maka derajat pencemaran jelas menjadi lebih berat, dan proses biodegradasi pun relatif lama. Pengolahan limbah hingga tahap sekunder, jelas sangat membantu badan air dalam mendegradasikan limbah. Terlebih jika pengolahan limbah telah dilakukan hingga tahap tersier, berarti limbah yang dibuang ke lingkungan telah setara dengan limbah yang diproses secara biodegradasi anaerob alami.

Bagian dari badan air yang tercemar berat biasanya adalah di area titik poin pembuangan limbah. Semakin ke hilir, konsentrasi limbah secara perlahan semakin menurun karena adanya pengenceran, penyebaran dan proses biodegradasi. Di musim kering, volume dan aliran air menurun. Ini menyebabkan pengenceran limbah relatif rendah sehingga ini akan meningkatkan toksisitas limbah. Sebaliknya, di musim hujan justru terjadi pengenceran besar-besaran dari limbah. Derajat pencemaran akan menurun, tetapi ini menimbulkan konsekuensi lain, yakni semakin luasnya area yang tercemar oleh limbah karena aliran air yang deras dengan volume besar. Kondisi ini akan lebih parah lagi jika sempat terjadi banjir. Hal ini memperjelas pemahaman kita bahwa di daerah hulu, derajat pencemaran air cenderung lebih rendah daripada di daerah hilir; atau

dataran tinggi cenderung mengalami derajat pencemaran air yang kecil (reservoir air besar, reoksigenasi tinggi, aliran air cenderung membawa polutan ke lembah) dibandingkan dengan di dataran rendah.



## **BAB VIII. TANAH**

Tanah adalah campuran kompleks bahan-bahan anorganik (tanah lempung, tanah berbutir kasar, kerikil, pasir), bahan-bahan organik yang sedang dalam proses pembusukan/penguraian, air, udara, dan jutaan makhluk hidup. Tanah ini terbentuk jika organisme mati membusuk, batuan dasar melapuk dan hancur, dan berbagai macam bahan hasil erosi terkumpul dan membentuk sedimentasi. Tanah inilah yang secara keseluruhan akan menyediakan makanan dan kebutuhan lain bagi manusia, misalnya :

- a. Menumbuhkan tanaman untuk keperluan sandang, pangan, dan obat-obatan.
- b. Membantu menjernihkan air untuk kebutuhan air minum.
- c. Membantu pembusukan materi organik sehingga dapat didaurulang.
- d. Menyediakan nutrisi secara langsung bagi kelangsungan proses sirkulasi rantai makanan dan jaring makanan di lingkungan tanah dan perairan.

Komponen-komponen tanah ini berada pada lapisan-lapisan tanah (atau horizon tanah) tertentu yang dapat dilihat bila tanah “dipotong”, karena dari profil tanah itulah dapat diketahui kandungan komponen dari tiap lapisannya. Misalnya, tanah tua paling sedikit mengandung 3 lapisan , sedangkan tanah yang baru justru sangat sedikit lapisannya.

Profil tanah yang lengkap umumnya mengandung lapisan O hingga lapisan C dengan tingkat ketebalan yang bervariasi. *Lihat skema pada transparansi.*

Ciri dari masing-masing lapisan (atau horizon) pada suatu profil tanah adalah sebagai berikut:

1. *Lapisan teratas (Top Layer, Surface Litter, Horizon O).*

Warna tanah coklat kehitaman (karena banyak bahan organik dan kaya akan N). Terdiri dari bahan-bahan organik (daun-daun yang jatuh dan baru terdekomposisi sebagian), limbah hewan, fungi, dan bahan organik yang lain. Di lapisan ini banyak terdapat organisme hidup, sehingga terjadi interaksi antar organisme maupun antara organisme dengan material yang ada. Hal ini memungkinkan terjadinya dekomposisi material organik. Kelembaban tanah di lapisan permukaan ini juga sangat menguntungkan bagi pengangkutan nutrisi tanah menuju ke akar, batang, daun dan tempat lain.

2. *Horizon A (Top Soil).*

Lapisan ini banyak mengandung humus yaitu campuran bahan-bahan organik yang telah terdekomposisi, organisme, dan partikel-partikel anorganik. Humus itu sendiri sebenarnya adalah hasil proses dekomposisi yang lambat, sehingga materi masih bersifat lengket, berwarna coklat, dan mengandung bahan-bahan yang belum terdekomposisi dengan sempurna. Lapisan humus yang melapisi tanah dapat berfungsi menahan air di permukaan tanah. Kondisi semacam ini sangat menguntungkan bagi tanaman karena menyediakan banyak bahan organik. Oleh karena itu, pada horizon ini banyak terdapat akar tumbuh-tumbuhan. Tanah sejenis ini disebut tanah subur (**tanah fertil**). Mudah tererosi. Warna tanahnya cenderung lebih gelap daripada horizon O.

3. *Horizon E (Zone of Leaching).*

Merupakan lapisan dibawah horizon A. Tekstur tanahnya tidak terlalu padat, sehingga bersifat porous (mudah dilalui oleh air). Di horizon ini pula materi anorganik dapat larut maupun tersuspensi dan terpenetrasi ke lapisan di bawahnya.

4. *Horizon B (SubSoil)*

Mengandung sebagian besar bahan-bahan anorganik (akumulasi besi, aluminium, dll.), senyawa-senyawa dari humifikasi dan terkadang juga mengandung tanah liat yang kesemua komponen tersebut merupakan hasil akumulasi proses leaching dari lapisan di atasnya.

5. *Horizon C (Parent Material)*

Mengandung material anorganik yang merupakan hasil pelapukan sebagian dari batuan dasar.

6. *R (Bedrock)*

Lapisan yang tidak dapat dipenetrasi oleh material lain. Mengandung batuan dasar murni.

Terbentuknya tanah tidak terlepas dari proses geomorfologik. Dengan adanya proses geomorfologik, manusia dapat memahami segala bentuk perubahan fisik dan kimiawi tanah. Tanah dapat terbentuk melalui proses :

1. Proses *eksogenik*, yaitu proses yang disebabkan oleh kekuatan yang berasal dari lapisan luar bumi. Misalnya :
  - a. Pelapukan, baik secara mekanik maupun kimiawi.
  - b. Pengotoran secara massal
  - c. Erosi oleh sungai, ombak laut, gletser, angin, turbiditas
2. Proses *endogenik*, yaitu proses yang berasal dari lapisan-lapisan dalam bumi.
  - a. Vulkanisme
  - b. Gempa
  - c. Diastrophisme (orogenik atau pembentukan gunung, epirogenik atau proses pengangkatan lapisan dalam bumi).

Ruang-ruang (pori) antara materi organik padat dengan partikel-partikel anorganik pada lapisan teratas (horizon O) dan lapisan atas tanah mengandung berbagai komponen anorganik antara lain :

1. *Udara.*

N dan O adalah yang paling dominan dan terbanyak di lapisan top soil. Unsur ini diperlukan sel-sel tanaman untuk respirasi dan diserap via akar.

2. *Air.*

Air hujan di permukaan tanah akan mengalami perkolasi ke dalam lapisan-lapisan tanah via pori (prosesnya disebut *infiltrasi*). Selama infiltrasi, air juga melarutkan dan sekaligus membawa komponen-komponen dari permukaan ke lapisan bawah (*leaching*).

Berdasar warna, kandungan material, porositas, kedalaman dan pHnya, tanah dapat juga dikelompokkan menjadi :

1. *Tanah padang gurun (Desert).*

Banyak batuan dan kerakal di permukaan. Humus tipis. Warnanya coklat hingga coklat kemerahan. Mengandung akumulasi partikel tanah halus,  $\text{CaCO}_3$  dan garam-garam terlarut. Bertemperatur tinggi dan kering (beriklim panas dan kering).

2. *Tanah padang rumput (Grassland Soil, Semiarid climate).*

Bersifat alkalin, warna gelap, kaya akan humus, mengandung lempung dan  $\text{CaCO}_3$ . Beriklim cenderung panas.

3. *Tanah hutan hujan tropis (Tropical rain forest soil).*

Kelembaban cukup tinggi. Humusnya bersifat asam. Iklimnya tropik. Lapisan tanah sebelah dalam mengandung akumulasi Al dan Fe yang tercampur dalam tanah liat.

4. *Tanah hutan hujan basah (Deciduous forest soil).*

Iklimnya sedang dengan kelembaban tinggi. Susunan lapisan-lapisan tanahnya dari permukaan atas ke bawah umumnya adalah sebagai berikut: sampah hutan dan mold, dibawahnya terdapat campuran humus dan mineral, lapisan silt berwarna abu-abu kecoklatan, lapisan tanah liat padat berwarna coklat gelap, dan terbawah adalah deposit tanah glasial.

5. *Tanah hutan cemara (Coniferous forest soil).*

Kelembaban tinggi dengan iklim yang dingin. Lapisan tanahnya tersusun sebagai berikut: bagian teratas mengandung humus dan sampah asam yang cukup tebal, dibawahnya lapisan tanah yang juga bersifat asam dengan warna lebih terang, dan lapisan bawahnya merupakan lapisan humus yang sangat tebal yang mengandung senyawa Fe dan Al tinggi.

### **8.1. Tekstur tanah , porositas dan pH tanah.**

Tekstur adalah sifat yang menunjukkan bentuk, ukuran butir dan pola susunan butir mineral yang terdapat di dalam masa batuan. Misalnya : *tekstur granular* (butiran mineralnya memiliki ukuran relatif seragam), *tekstur porfiritik* (butiran mineralnya memiliki dua variasi kelompok ukuran), *tekstur felsitik* (butiran mineralnya sangat halus), *tekstur fragmental* (massa batumannya tersusun dari pecahan runcing hasil letusan gunung berapi). Dengan demikian, jenis tekstur tanah juga sangat ditentukan oleh banyak sedikitnya variasi kandungan batuan tanah. Misalnya tanah *clay* (partikelnya sangat halus, berukuran kurang dari 1/256 mm), *silt* (partikelnya relatif halus, berukuran antara 1/256 – 1/16 mm), *sand* (pasir berukuran sedang, berukuran 1/16 – 2 mm), *granule* (kerikil, berukuran 2 – 4 mm), *pebble* (kerakal, berukuran 4-64 mm), *cobble* (berangkal, berukuran 64-256 mm), dan *boulder* (berukuran kasar yaitu lebih dari 256 mm). Tanah yang mengandung campuran clay, pasir, silt dan humus disebut **loam** (tanah gembur). Tanah liat (lekat dan lengket) umumnya banyak mengandung partikel tanah dari jenis

clay. Tanah berdebu komponen utamanya tersusun dari jenis tanah silt. Sedangkan tanah yang mudah terurai (remahan) umumnya merupakan campuran antara loam dan tanah lain dengan berbagai variasi ukuran.

Porositas tanah ditentukan oleh jarak tiap partikel-partikel tanah, volume tanah, dan volume porusnya. Tanah berporositas tinggi biasanya banyak porinya sehingga mampu menahan air dan udara lebih banyak daripada yang berporositas rendah. Tanah lempung (tanah liat) sebenarnya memiliki banyak pori tetapi porinya kecil. Keadaan ini menyebabkan permeabilitasnya lambat sehingga infiltrasi air menjadi sedikit. Konsekuensinya, air menjadi mudah tergenang. Keadaan serupa terjadi pada jenis tanah gambut. Lapisan humus yang terlampau tebal menyebabkan porositasnya sangat lambat, sehingga air permukaan akan menggenang di atas humus.

Keasaman dan kebasaan tanah diekspresikan dengan pH tanah. Apabila pH tanah terlampau asam, maka keadaan ini perlu dinetralisir dengan menambahkan substansi alkalin, misalnya batu kapur yang merupakan bahan yang dapat mempercepat proses dekomposisi bahan organik dalam tanah. pH tanah yang terlampau basa ada kemungkinan terjadi karena peningkatan drainase sehingga komponen alkalinitasnya tercuci. Untuk mengatasinya, dapat ditambahkan sulfur yang dapat diubah oleh bakteri menjadi asam sulfat sehingga alkalinitas meningkat.

## **BAB IX. EROSI TANAH**

Tanah merupakan sumber daya alam yang sangat potensial. Oleh karena itu, manusia paling aktif dalam mengeksploitasi sumber daya alam ini. Salah satu akibat langsung terhadap tanah setelah dieksploitasi adalah erosi, yakni berpindahnya komponen dan unsur-unsur penting dalam tanah ke tempat lain akibat terbawa oleh aliran udara atau air di permukaannya. Kegiatan yang banyak menimbulkan erosi antara lain : pertanian, peternakan, penebangan hutan, pembangunan, pemanfaatan lahan terbuka yang berlebihan, transportasi, dan pembakaran hutan/lahan (peranggasan dan penggundulan hutan). Keadaan semacam ini akan selalu terjadi, dan hanya bisa dikurangi atau ditahan apabila terdapat banyak akar-akaran tumbuhan di lapisan permukaan tanah.

Ada dua kerugian utama dari erosi. Pertama, hilangnya tingkat kesuburan tanah karena lapisan tanah teratas (topsoil) yang merupakan lapisan penyedia unsur hara terkikis habis. Erosi yang terjadi pada lapisan topsoil dapat mengurangi fertilitas dan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Disamping itu, sedimen-sedimen tanah akibat erosi merupakan sumber pencemaran air terbesar karena dapat membuntu saluran irigasi, menurunkan volume air di berbagai saluran air, di reservoir, atau bahkan menurunkan volume air danau.

Lapisan topsoil sebenarnya merupakan sumber daya alam yang dapat diperbarui, akan tetapi memakan waktu yang relatif lama. Secara alami, topsoil mampu memperbaiki keadaan dirinya (self renewable) akan tetapi sifatnya sangat lambat (slowly renewable resources). Hal ini terjadi karena kemampuan penambahan topsoil sangat lambat. Sebagai contoh di daerah tropis, penambahan topsoil hanya dapat mencapai 1 inci (2,54 cm) dalam waktu 200 hingga 1000 tahun. Jika laju erosi lebih besar daripada laju pembentukan topsoil, maka tanah akan menjadi gersang dan banyak batuan. Daerah pertanian merupakan contoh terbaik untuk kasus ini, karena erosinya dapat mencapai 100 – 200 kali lipat kemampuan pembentukan topsoil. Sedangkan area erosi terbesar adalah di tempat-tempat kegiatan konstruksi. Kemampuan self renewable ini juga mengalami hambatan di daerah hutan, meskipun laju erosi di hutan jauh lebih rendah daripada di daerah pertanian, akan tetapi sistem perbaikannya berjalan jauh lebih lambat daripada di daerah beriklim panas.

*Kerugian kedua*, lapisan topsoil yang terangkut ke tempat lain, terkadang bukan menguntungkan daerah lain melainkan justru akan mencemari daerah tersebut. Misalnya, daerah baru tadi justru mengalami salinasi karena kelebihan unsur garam-garam tertentu yang dibawa oleh erosi dan tersedimentasi disana, atau terjadi sedimentasi di beberapa tempat daerah aliran sungai sehingga mendangkalan atau membentuk pulau-pulau kecil (delta) yang akan menghambat aliran sungai. Kelebihan garam tertentu ini jelas akan mengubah pH tanah sehingga peruntukannya pun berubah.

Pada prinsipnya, proses erosi melibatkan beberapa proses antara lain :

1. Berkurangnya jumlah batuan.
2. Transpor material.
3. Pembentukan gua (kavitasi).
4. Abrasi.
5. Akumulasi partikel dari batuan di sepanjang aliran sungai.
6. Pembentukan delta sungai.

Kemampuan erosi suatu sungai dapat diperhitungkan secara kuantitatif, yakni dengan mengetahui ukuran maksimum partikel alami yang dapat terangkut oleh aliran sungai dan menghitung total partikel yang dapat diangkut oleh aliran sungai. Secara alami, erosi akan menurun selama musim kering dan meningkat pada saat terjadi badai/hujan.

Kegiatan pertanian ternyata penyumbang terbesar bagi terjadinya erosi, yakni terucinya sebesar 7 % total topsoil di permukaan bumi. Keadaan ini diperburuk oleh kegiatan petani yang :

1. Memanfaatkan tanah-tanah yang tidak sesuai untuk pertanian guna diubah menjadi lahan pertanian untuk peningkatan produksi pangan.
2. Menggunakan area perbukitan terjal untuk agrikultur tanpa melakukan terasering sehingga dalam kurun waktu 10 – 40 tahun topsoil akan habis.
3. Berkurangnya tanaman pohon pelindung sehingga mengikis topsoil dan menimbulkan banjir di daerah lembah.
4. Hanya mengistirahatkan lahan selama 2-3 tahun saja, padahal kemampuan regenerasi topsoil perlu waktu 10 – 30 tahun.

5. Menggunakan pupuk dan irigasi secara besar-besaran, sehingga terjadi leaching besar-besaran.

Akibat lebih lanjut dari erosi adalah *penggurunan (desertifikasi)*. Proses penggurunan itu sendiri dikelompokkan menjadi 3, yakni :

1. *Penggurunan sedang (moderate desertification)*.  
Yaitu apabila kemampuan produktivitas tanah mulai menurun antara 10 – 25 %.  
Keadaan ini biasanya masih agak sulit untuk dideteksi.
2. *Penggurunan berat (severe desertification)*.  
Yaitu apabila kemampuan produktivitas tanah menurun hingga 25 –50 %.
3. *Penggurunan sangat berat (very severe desertification)*.  
Yaitu apabila kemampuan produktivitas tanah telah menurun lebih dari 50 %, diikuti dengan pembentukan bukit-bukit pasir.

Beberapa kegiatan lain yang menyebabkan desertifikasi antara lain :

1. Terlalu banyak dimanfaatkan untuk merumput bagi ternak (*grassing*), terlebih jika jumlah ternaknya besar sedangkan area perumputan kecil.
2. Pengelolaan yang tidak tepat terhadap sumber air dan tanah sehingga meningkatkan salinitas dan erosi.
3. Peningkatan kegiatan penanaman di daerah yang tidak tepat.
4. Deforestasi (perusakan hutan) dan pemnafaatan berlebihan sumber-sumber vegetasi tanpa diikuti kegiatan reboisasi.
5. Pemadatan tanah dengan mesin-mesin berat sehingga mengurangi porositas tanah dan menimbulkan erosi di permukaan.

Selama kurun waktu 50 tahun terakhir ini, telah terjadi desertifikasi seluas 810 juta hektare, atau rata-rata 60.000 km<sup>2</sup> per tahunnya. Disamping itu, kurang lebih 210.000 km<sup>2</sup> per tahun tanah di permukaan bumi terdegradasi sehingga kehilangan nutrien tanah dan tidak mampu lagi untuk dijadikan area perumputan. Di tahun 2000 ini diperkirakan akan terjadi desertifikasi sebesar 33 juta km<sup>2</sup>. Hal ini cukup membahayakan bagi kelangsungan hidup 1,2 milyar penduduk dunia.

Beberapa solusi yang cukup sederhana yang dapat diterapkan untuk mencegah timbulnya kerusakan parah pada sumber daya alam tanah ini antara lain :

1. *Tehnik penanaman.*

Sebaiknya tanah yang dimanfaatkan untuk pertanian sesedikit mungkin memanfaatkan mesin tanam, sehingga tanah permukaan tidak tergalib berlebihan, dengan demikian tanah yang tidak diaduk terlalu banyak akan sesedikit mungkin kehilangan topsoil.

2. *Pembentukan teras.*

Tehnik ini baik untuk diterapkan di daerah yang memiliki kemiringan yang tajam, sehingga tidak terlampau banyak topsoil akan tererosi pada waktu dilakukan pengairan.

3. *Tehnik pembalikan tanah.*

Sebaiknya dilakukan pembalikan tanah dengan cara miring kesamping sehingga tidak keseluruhan tanah dibalikkan. Hal ini akan menghemat hara topsoil di tanah pertanian tersebut.

4. *Jalur penanaman.*

Sebaiknya tanaman di tanam dalam deretan teratur, jarak teratur, dan disela-selanya dibiarkan tumbuh rumput atau tanaman lain sebagai pemasok N dan pencegah hilangnya topsoil bila terkena run off atau angin.

5. *Rotasi tanaman.*

Tehnik ini baik bagi tanah karena tanah tidak diforsir haranya untuk mensuplai tanaman tertentu, melainkan tanah mendapatkan kembali hara yang berkurang dari jenis tanaman lain yang disemaikan.

6. *Penggunaan tehnik agroforestri.*

Yaitu penanaman tanaman pertanian yang dikombinasi dengan tanaman untuk hutan, sehingga akan didapatkan sekaligus kayu bakar dan hasil pertanian. Selain itu, kanopi yang terbentuk akan mengurangi hilangnya air di permukaan tanah, menjaga kelembaban, dan pelepasan haranya dapat diperlambat. Selain itu, daun-daunan tanaman pertanian dan kehutanan dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak.

7. *Reklamasi tanah.*

Tanah yang rusak akibat erosi atau pengerukan dapat direklamasi dengan menanaminya menggunakan tanaman semak, perdu, atau tanaman lain sejenis yang akan cepat menyediakan unsur hara, menahan hasil erosi dari tempat lain, dan membantu pelapukan batuan dibawahnya.

8. *Penanaman dengan tanaman penahan angin.*

Tanaman yang cocok untuk penahan angin ditanam berderet yang letaknya berlawanan dengan arah angin reguler. Hal ini dimaksudkan untuk menahan dan mempertahankan unsur hara yang penting agar tidak tererosi oleh angin. Keuntungan lainnya adalah mempertahankan kelembaban, pemasok bahan bakar kayu, dan menyediakan habitat baru bagi hewan-hewan lain yang memerlukan.

9. *Menggunakan tanah sesuai dengan peruntukannya dan mengontrol penggunaannya.*

Hal ini jelas menguntungkan. Tanah yang produktif untuk lahan pertanian tentu akan memberikan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan tanah yang tidak subur. Selain itu, tanah juga dapat dijaga agar tidak mengalami kelelahan. Tanah yang tidak subur mungkin dipergunakan untuk keperluan lain, misalnya perumahan atau ladang rumput terbuka.

Tanah yang terlanjur rusak, tidak subur, atau kelelahan mungkin dapat diperbaiki untuk sementara. Biasanya penambahan pupuk organik dari kotoran hewan atau tanaman sangat dianjurkan, atau dapat juga menambahkan dengan pupuk anorganik yang sudah banyak diperdagangkan. Namun, pupuk anorganik ini pada jangka waktu tertentu justru akan merugikan tanah itu sendiri karena kemampuan tanah untuk menyerap dan menyimpan air justru menurun, tanah semakin memadat sehingga aerasi berkurang, dan selebihnya akar tanaman akan sulit menembus tanah padat sehingga makin berkurang jumlah tanaman yang bisa bertahan hidup. Selain itu, pupuk anorganik hanya mensuplai 2 atau 3 macam kebutuhan unsur tanah, sedangkan tanah memerlukan lebih kurang 20 macam unsur nutrien yang dibutuhkan tanaman. Kerugian lain adalah pupuk anorganik akan menimbulkan pencemaran tanah atau perairan yang jauh lebih luas karena kandungan pupuk tadi dapat terbawa sepanjang perairan, bagi perairan itu sendiri juga dapat menyebabkan eutrofikasi, kematian biota air lain, atau bahkan mencemari air tanah

jika terpenetrasi ke dasar perairan. Bagaimanapun juga, pupuk organik adalah yang terbaik untuk mengembalikan kesuburan tanah, terlebih jika pupuk organik tersebut mengandung :

1. *Komponen dari hewan.*

Pupuk ini akan menambah N organik, merangsang pertumbuhan bakteri dan fungi, serta dapat memperbaiki struktur tanah. Komponen ini sangat dianjurkan untuk tanah rusak yang diakibatkan oleh penggunaan mesin-mesin pertanian sebelumnya.

2. *Komponen dari hijauan tanaman.*

Hijauan segar dapat langsung dicampurkan kedalam tanah, atau sengaja ditanami dengan tanaman tertentu yang masih mampu hidup di tanah tersebut kemudian setelah tumbuh tanahnya diolah dan tanamannya tidak perlu dicabuti lebih dahulu. Campuran tanah dan hijauan tersebut akan mengundang kehidupan mikroorganisme dan organisme tingkat rendah lainnya untuk mengaktifkan kembali tanah yang lelah.

*Kompos.* Merupakan pupuk alami yang kaya unsur hara. Pupuk ini sangat bagus untuk diberikan pada tanah rusak atau lelah karena membantu proses aerasi tanah permukaan, menambah unsur yang diperlukan tanah, menyerap dan menyimpan air, dan mencegah erosi.

## BAB X. LIMBAH DAN PENCEMARAN TANAH

### X.1. Jumlah dan Macam Limbah

Macam limbah dapat dikelompokkan menjadi 3, yaitu :

1. *Limbah domestik.*

Disebut juga limbah rumah tangga, yaitu limbah yang dibuang dari perumahan atau perkampungan penduduk.

2. *Limbah perdagangan.*

Hasil buangan dari aktivitas perdagangan atau bisnis.

3. *Limbah industri.*

Limbah yang dihasilkan dari proses mineralisasi, pemrosesan, maupun pengolahan bahan mentah. Kelompok limbah ini masih dapat dibedakan menjadi dua kategori lagi, yakni: limbah yang berasal dari penambangan dan ekstraksi bahan-bahan mineral (termasuk pengolahan dan pemrosesannya), dan limbah industri yang menggunakan tenaga nuklir.

Sebelum era industri dimulai, limbah domestik yang dihasilkan dari kegiatan penduduk merupakan penyumbang pencemaran tanah terbesar bila dibanding dengan sumber lain.

| JENIS LIMBAH             | PROSENTASE |
|--------------------------|------------|
| Domestik dan perdagangan | 71,8       |
| Industri                 | 9,7        |
| Industri konstruksi      | 16,4       |
| Jenis lain               | 1,5        |

Keadaan menjadi berubah setelah era industrialisasi dimulai. Saat ini prosentase penyumbang limbah pencemaran telah bergeser menjadi sebagai berikut :

| JENIS LIMBAH                              | PROSENTASE |
|---|------------|
| Domestik dan perdagangan                  | 8,5        |
| Pertambangan                              | 67         |
| Konstruksi                                | 2          |
| Pembangkit listrik, debu asap bahan bakar | 7,3        |
| Industri lain                             | 15,2       |

Prosentase limbah dari sektor industri nampaknya lebih kecil daripada limbah dari sektor pertambangan, akan tetapi komposisi limbah industri jauh lebih bervariasi. Dalam permasalahan ini, kita perlu meninjaunya dari dua segi, yaitu ;

1. Segi kuantitatif limbah.

Yakni limbah yang dihasilkan oleh suatu aktivitas jumlahnya sangat besar (prosentasenya menjadi sangat tinggi).

2. Segi kualitatif limbah.

Limbah yang dihasilkan tidak banyak, tetapi ada kecenderungan menjadi berbahaya karena komponen yang terkandung didalamnya bersifat toksik (biasanya mengandung senyawa kimia yang berbahaya bagi makhluk hidup).

Menurut komisi tehnik dari departemen lingkungan hidup, limbah industri yang bersifat toksik dapat berasal dari :

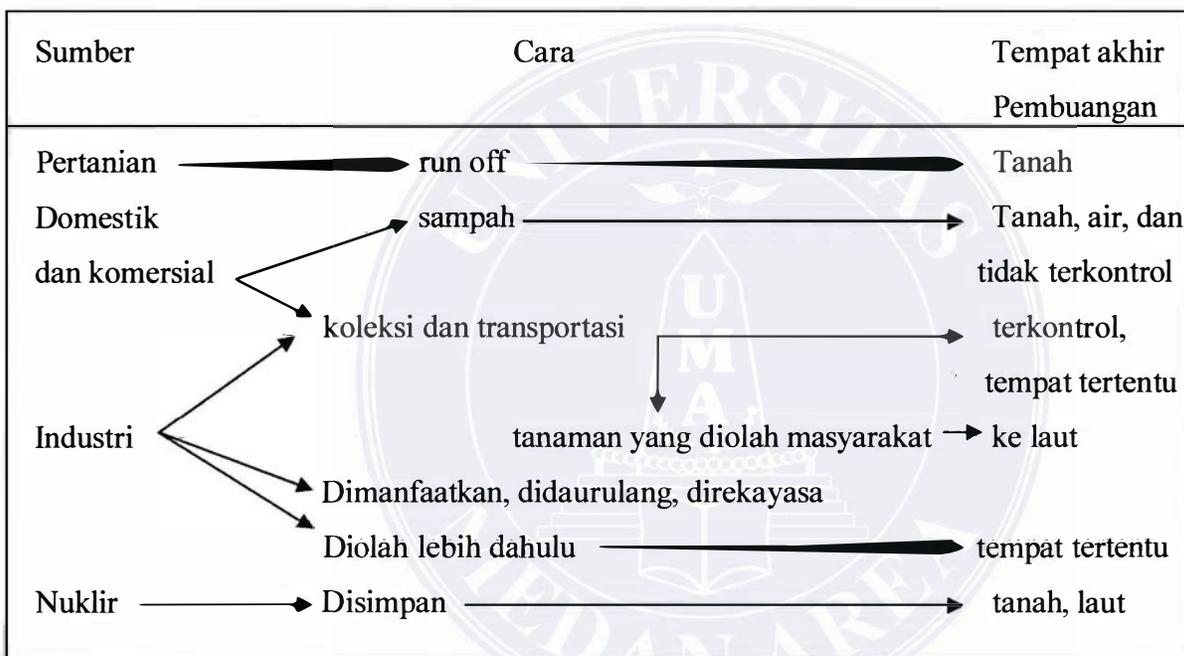
|  |        |
|--|--------|
| 1. Limbah pabrik (umum)                | 10,5 % |
| 2. Limbah yang perlu pemrosesan        | 82,6 % |
| 3. Limbah yang mudah terbakar          | 1,2 %  |
| 4. Limbah yang mengandung asam/kaustik | 3,7 %  |
| 5. Limbah campuran dan toksik          | 1,8 %  |

Istilah toksik berarti “*beracun*”, yakni suatu substansi yang apabila terabsorpsi oleh organisme akan merusak kesehatan atau bahkan kehidupan organisme tersebut dalam waktu yang relatif singkat atau dalam kurun waktu yang cukup panjang. Secara definitif, semua substansi dapat dikatakan toksik apabila konsentrasinya tinggi dan atau jumlah yang terabsorpsi besar. Ditinjau dari segi lingkungan, polutan yang dianggap

toksik tergantung pada jumlah polutan yang masuk ke lingkungan dan efek yang ditimbulkannya.

## X. 2. Pembuangan limbah Secara Umum

Umumnya, limbah padat ditanam, di buang, atau ditumpuk di tanah sebagai sampah, pengisi bekas-bekas area pertambangan, atau dionggokkan begitu saja. Hanya sebagian kecil polutan dibuang ke perairan (laut). Berikut ini gambaran umum pembuangan limbah :



### A. Limbah industri

Limbah industri adalah buangan yang diproduksi secara terus menerus, oleh karena itu memerlukan fasilitas penampungan. Limbah yang masih berupa bahan mineral mentah masih mungkin untuk dikumpulkan di sekitar pabrik untuk direkayasa. Hal ini berbeda dengan limbah dari pemrosesan, yang terkadang harus langsung dipindahkan ke area-area pembuangan yang khusus agar tidak membahayakan, atau perlu diolah lebih dahulu di unit pengolah limbah sebelum dibuang. Limbah yang diolah lebih dahulu sebenarnya cukup menguntungkan, karena : volume limbah berkurang, mempermudah

pembuangan, ada kemungkinan akan didapatkan ekstrak material yang mungkin masih dapat dimanfaatkan.

Limbah industri umumnya berada dalam bentuk padat, cair, slurry, atau efluen yang mengandung berbagai substansi kimia maupun materi lain yang tersuspensi. Limbah padat dalam jumlah besar biasanya dihasilkan dari area pertambangan. Limbah ini dibuang dengan metode tipping ke dalam tanah atau ke laut. 70 % diantaranya sama sekali tidak diolah dulu sebelum dibuang. 26 % dari limbah diubah peruntukkannya, yakni dijadikan bahan dasar untuk pembuatan konkret atau bata. Sisanya digunakan langsung untuk landfill (bahan timbunan).

Industri manufaktur menghasilkan limbah padat, semi padat, cair dan gas yang masing-masing dapat saja mengandung komponen bersifat toksik, non-toksik, mudah terbakar, atau tidak mudah terbakar. Limbah yang tergolong berbahaya biasanya memiliki kadar asam atau alkali tinggi. Hasil survey dari 600 pabrik di Inggris menunjukkan bahwa pabrik-pabrik tersebut bisa menghasilkan limbah hingga 1 juta ton per tahunnya. Problemnnya adalah bahwa pembuangan limbah industri ini masih merupakan permasalahan rumit. Ternyata, 88% limbah tadi umumnya langsung dibuang ke atas tanah terbuka (dalam bentuk ongkok) tanpa melalui pengolahan terlebih dahulu. Sedangkan limbah yang sudah diolah ternyata prosentasenya baru mencapai 2,7% saja. Untuk jenis limbah toksik, 51,5 % limbah berbahaya ini berbentuk slurry di buang langsung ke danau; 1,1 % dibakar di dalam tanur; 1,6 % di buang ke laut; 38 % di buang ke permukaan tanah; 7,8 % dimanfaatkan untuk mengisi bekas galian di area pertambangan; sisanya dibiarkan berupa sampah yang terongkok secara lokal. Limbah toksik yang mengandung asam atau alkali jumlahnya dapat mencapai 72,7%, dan seperempatnya berada dalam bentuk slurry. Limbah toksik yang dibakar umumnya tidak sampai sebesar 1 %.

Limbah yang berbentuk semiliquid terkadang merupakan buangan yang telah diolah lebih dahulu. Pengolahannya mungkin secara fisik (dengan melakukan penyaringan bertahap), khemis (dengan menambah bahan kimia tertentu, atau menetralkan pH dengan menambahkan asam atau alkali), biologik (dengan mengubah bahan organik menjadi phenol atau alkohol melalui proses fermentasi), atau kombinasi ketiganya.

Limbah toksik, misalnya yang mengandung sianida akan lebih aman dibuang bila didekomposisi lebih dahulu dengan menambahkan khlorin kedalamnya. Demikian pula limbah yang mengandung logam berat, akan lebih baik jika dinetralisir dengan cara melakukan presipitasi limbah dengan membentuk hidroksidanya. Beberapa jenis limbah dapat pula *bereaksi secara sinergis* bila bertemu dan bercampur menjadi satu. Misalnya limbah A yang mengandung  $\text{NaHSO}_4$ ,  $\text{NaSO}_4$ , dan sejenisnya, bila bertemu dengan limbah B yang mengandung  $\text{H}_2\text{O}$ , Nickel, dsb. Akan memunculkan senyawa baru berupa  $\text{H}_2\text{SO}_4$  yang cukup membuat fatal jika terhirup oleh makhluk hidup.

Limbah padat dapat berubah menjadi bahan pencemar khemis, terlebih jika di dalamnya terkandung bahan organik tinggi. Proses degradasi limbah secara alami oleh mikroorganisme akan menghasilkan gas-gas tertentu yang cukup berbahaya, misalnya terbentuknya gas ammonia (penyebab iritasi), CO (gas beracun),  $\text{CO}_2$  (dapat larut ke dalam air dan membentuk asam karbonat),  $\text{H}_2\text{S}$  (bau menyengat yang menyebabkan iritasi dan beracun), dan metan.

## **B. Limbah Domestik.**

Limbah domestik, yang meliputi: debu, abu, sayuran, makanan sisa, kertas, gelas, logam, plastik, dsb. Sebagian besar (86%) hanya dibuang begitu saja tanpa diolah lebih dahulu. Ini berarti limbah dibiarkan teronggok, menyebar, menutup lapisan tanah, atau ditanam seperlunya saja. Cara ini akan menjadi efisien bila dilakukan di area bekas pertambangan atau tanah-tanah rusak lainnya, dilakukan secara terkontrol, dan menghindari terjadinya penumpukan berlebihan.

Menurut data dari Inggris, limbah perdagangan dan rumah tangga umumnya dibuang dengan cara sebagai berikut :

|  |        |
|--|--------|
| a. Tipping (sampah murni yang dionggokkan) | 86,3 % |
| b. Incineration (sampah yang dibakar)      | 9,5 %  |
| c. Pulverisation (sampah yang dihancurkan) | 3,7 %  |
| d. Composting (sampah yang dibuat kompos)  | 0,5 %  |

Pulverisasi sampah adalah cara yang cukup efektif, yakni memecah-mecah limbah menjadi partikel-partikel yang lebih kecil sehingga mengurangi volume limbah, mudah

didegradasi, dan dapat diaurulang. Misalnya pembentukan mulch yang berasal dari penghancuran sisa-sisa batang kayu pepohonan dan daun kering yang tidak dapat dimanfaatkan lagi.

Insinerasi merupakan cara pengolahan limbah yang juga cukup efektif. Limbah dimasukkan ke dalam pemanas (oven) dengan suhu 950 – 1100 oC. Ini menguntungkan karena mengurangi kemungkinan korosi oleh asap pembakaran dan mengurangi emisi bau (menghindari fermentasi). Dengan cara ini, volume limbah dapat dikurangi antara 60 – 90 %, bebas bakteri, tidak basah . Panas yang dihasilkan juga dapat dimanfaatkan untuk pembangkit tenaga.

Treatment dengan cara komposting tidak dapat dilakukan untuk semua jenis limbah sebab cara ini dilakukan dengan proses biologik, yakni secara aerob menggunakan mikroorganisme guna membantu mengubah materi organik menjadi materi yang lebih stabil (materi anorganik). Limbah yang baik untuk dikomposkan adalah limbah organik (terutama dari tumbuhan). Sedangkan materi-materi anorganik harus diseleksi lebih dahulu karena materi ini tidak akan berubah selama proses komposting berlangsung. Disamping itu, materi organik mungkin masih dapat didaurulangkan kembali. Proses komposting ini juga menghasilkan panas yang dapat digunakan untuk membunuh organisme patologik dalam limbah dalam waktu 4 hari. Komposting cukup menguntungkan karena dapat mereduksi volume limbah hingga 50 %. Komposnya dapat digunakan untuk pupuk tanah. Akan tetapi, proses ini menjadi kurang efektif karena biayanya cukup tinggi dan petani kurang mau menggunakan kompos karena miskin unsur K dan N anorganik, sehingga pemakaiannya masih harus dikombinasikan dengan pupuk lain yang mengandung N dan K anorganik.

Cara sederhana yang dapat dilakukan oleh semua pihak untuk mengurangi pencemaran tanah ini antara lain adalah :

1. Dengan sengaja mengurangi volume limbah, atau mentreatment limbah dalam incinerator terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan.
2. Membuang limbah di tempat-tempat bekas galian tambang (landfill).
3. Melakukan program reuse (pemanfaatan kembali) secara konsisten.

## **BAB XI. PENCEMARAN TANAH OLEH AKTIVITAS PERTANIAN**

Pada 2 – 3 dekade terakhir ini, teknologi di bidang pertanian dirasakan sangat meningkat. Beberapa bentuk hasil teknologi yang sudah dapat dirasakan antara lain peningkatan sumber pakan, peningkatan penggunaan mesin-mesin pertanian, peningkatan penggunaan pupuk anorganik dan pestisida organik, domestikasi peternakan, dan sebagainya. Keadaan ini di satu sisi menguntungkan karena penggunaan tanah untuk lahan pertanian dapat ditekan sebesar 7 %, demikian pula dengan penggunaan tenaga kerja dapat dikurangi sebesar 50 % dengan tetap bisa menjaga kuantitas dan kualitas produksi. Tetapi dampak di sisi lainnya lagi juga terasa, yakni peningkatan limbah organik dan bahan kimia dari sektor pertanian.

### **XI. 1. Penggunaan Pupuk (fertilizer).**

Secara alami, tanaman dan hewan yang mati akan diuraikan di dalam tanah oleh mikroorganisme tanah menjadi humus (senyawa organik kompleks yang merupakan komponen utama penyusun tanah). Humus ini diperlukan untuk membantu retensi air, memperlancar gerakan air tanah, menyediakan makanan bagi organisme tanah/air, dan sebagai sumber nutrisi bagi tumbuhan. Molekul-molekul organik yang didekomposisi oleh bakteri akan berubah menjadi nitrat, fosfat, potasium, sulfur, dll. Perubahan ini terjadi melalui mekanisme alamiah via siklus biogeokimia.

Pada abad 19, para petani sangat memperhatikan mengenai rotasi tanaman. Hal ini dimaksudkan untuk memelihara kesuburan tanah pertanian. Akan tetapi, pada abad 20 hal tersebut lama kelamaan tidak lagi menjadi prioritas, bahkan jarang atau tidak pernah lagi dilakukan. Teknik pertanian yang modern memungkinkan petani menanam jenis tanaman yang sama pada tanah yang sama secara terus menerus dalam beberapa tahun. Aktivitas pertanian semacam ini ternyata menimbulkan perubahan pada ekosistem tanah. Belakangan disadari bahwa humus tanah menipis sehingga jumlah nutrisi bagi tanaman menurun. Selain itu, terjadi juga penurunan kualitas biji-bijian yang dihasilkan yang ternyata rentan terhadap penyakit tanaman. Keadaan ini mendorong petani untuk menggunakan pestisida yang lebih banyak lagi.

Untuk menanggulangi keadaan ini, pertanian modern menggantungkan sepenuhnya pada perlakuan tanaman dan tanah secara khemis. Misalnya, dengan memberikan tambahan pupuk NPK buatan (pupuk anorganik). Pupuk ini diyakini dapat digunakan secara cepat dan mudah karena bentuknya siap dikonsumsi oleh tumbuhan tanpa perlu pengubahan lebih dahulu secara mikrobiologis. NPK merupakan derivat humus sehingga dapat langsung dilepas ke tanah dan biasanya sebagian besar dapat diserap oleh tanaman. Akan tetapi, NPK yang disebar ini biasanya penggunaannya melebihi keperluan bagi tanaman itu sendiri. Sebagai akibatnya, sebagian NPK justru akan tercuci dan masuk serta mencemari badan-badan air, terlebih bila area pertaniannya berada di daerah bercurah hujan tinggi dan banyak menggunakan air untuk pengairan. Contoh, kandungan N perairan saat ini telah meningkat 5 – 7 kali lipat bila dibanding kandungan N tahun 1948. Sedangkan kandungan P di seluruh permukaan bumi ini diperkirakan telah lepas dari tanah sebesar 377.000 ton per tahun dan masuk ke badan air. Meningkatnya N dan P di air jelas akan menimbulkan pencemaran air, yakni menyebabkan pertumbuhan berlebihan pada tanaman dan mempengaruhi kesehatan manusia.

### **1. Intensifikasi Peternakan**

Sistem peternakan modern dirancang untuk tujuan mendapatkan metode yang intensif guna meningkatkan produksi. Kebiasaan memelihara ternak dengan cara menggembalakan di padang luas secara bebas dianggap tidak efisien lagi khususnya dalam hal pertambahan berat ternak dan suplai pakan. Dengan melakukan domestikasi ternak sistem kandang, diharapkan dapat meningkatkan hasil secara lebih efisien, sehingga jumlah daging, telur, susu, mentega dan keju dapat diperoleh secara maksimal.

Sistem kandang atau sistem tertutup adalah sistem pemeliharaan ternak dalam jumlah terbatas di suatu ruang/tempat tertentu, dengan pengaturan suhu, makanan dan kesehatan dibawah kontrol pengawasan khusus. Sistem ini terbukti dapat meningkatkan berat ternak hingga maksimum. Konsekuensinya, limbah organik juga meningkat jumlahnya. Limbah ini bersumber dari :

1. *Ekskret* hewan ternak itu sendiri, berupa limbah padat dan cair.
2. *Sekret*, berupa limbah cair dari proses pemerahan dan pengolahan susu.

3. *Limbah pencucian kandang* (slurry), limbah padatnya umumnya tidak terlalu banyak karena jerami sudah mulai berkurang penggunaannya.
4. *Silage*. Bahan makanan ini mengandung materi organik tinggi, dan biasanya dipersiapkan sebagai cadangan makanan di musim dingin. Silage itu sendiri diproduksi pada musim panas. Dibuat dari jerami atau rumput segar yang disimpan di dalam bak tertutup dan dibiarkan terfermentasi oleh bakteri. Limbah dari pembuatan silage ini sangat berbau, pHnya sangat asam, dan mengandung bahan organik tinggi. Limbah ini sangat potensial dalam menimbulkan pencemaran tanah dan air.

Pembuangan limbah peternakan sejauh ini tanpa melalui proses pengolahan lebih dahulu, terlebih di area peternakan kecil dan menengah. Hal ini sering terjadi karena proses pengolahan limbah itu sendiri cukup memakan biaya. Cara umum yang banyak dilakukan guna menangani limbah peternakan adalah membuang limbah cair ke tanah dan meratakan limbah padat di atas tanah pada saat musim yang tepat. Dalam jumlah yang kecil, limbah kering tersebut dapat didaurulangkan. Namun limbah yang terlanjur terserap ke dalam tanah dapat mencemari badan air, sehingga kemungkinan dapat mencemari sumber air minum bagi ternak itu sendiri.

## **BAB XII. PENCEMARAN OLEH INDUSTRI**

Pembangunan industri di Indonesia berdasarkan konsepsi Wilayah Pusat Pertumbuhan Industri mencerminkan keterpaduan dan keterkaitan serta bertumpu pada potensi sumberdaya alam dan energi. Atas dasar ini dilakukan dua macam pendekatan yaitu *pendekatan sektoral* dan *pendekatan regional*. Pendekatan sektoral dilakukan melalui pembangunan industri dasar, sedangkan pendekatan regional dilakukan melalui pengembangan wilayah industri, meliputi wilayah pusat pertumbuhan industri, zona industri, kawasan industri, pemukiman industri kecil dan sentra-sentra industri kecil.

Pada dasarnya, pengembangan wilayah adalah usaha pembangunan daerah yang memperhitungkan keterpaduan program sektoral seperti pertanian, pertambangan, aspirasi masyarakat, dan potensi lain dengan memperhatikan kondisi lingkungan.

Pembangunan industri dasar berorientasi pada lokasi tersedianya sumber pembangunan lainnya. Pada umumnya lokasi industri dasar belum tersentuh pembangunan, baik dalam arti kualitatif maupun kuantitatif, bahkan masih bersifat alami. Adanya pembangunan industri ini akan berakibat terjadinya perubahan lingkungan seperti berkembangnya jaringan infrastruktur, dan kegiatan lain yang menunjang kegiatan yang telah ada.

Pembangunan di satu pihak menunjukkan dampak positif terhadap lingkungan dan masyarakat. Di pihak lain, apabila pembangunan ini tidak diarahkan akan menimbulkan berbagai masalah seperti konflik kepentingan, pencemaran lingkungan, kerusakan, *pengrusakan sumber daya alam*, masyarakat konsumtif dan dampak sosial masyarakat yang merugikan. Pembangunan industri pada gilirannya membentuk suatu lingkungan kehidupan zona industri. Untuk itu diperlukan perencanaan yang matang dengan konsep tata ruang.

Tujuan rencana tata ruang ini untuk meningkatkan azas manfaat berbagai sumber daya yang ada dalam lingkungan seperti meningkatkan fungsi perlindungan terhadap tanah, hutan, air, flora/fauna, fungsi industri, fungsi pertanian, fungsi pemukiman dan fungsi lain.

Peningkatan fungsi setiap unsur dalam lingkungan artinya meningkatkan dampak positif semaksimal mungkin sedangkan dampak negatifnya harus ditekan seminimal

mungkin. Konsepsi pembangunan wilayah dengan dasar tata ruang sangat dibutuhkan dalam upaya pembangunan industri berwawasan lingkungan.

### **Klasifikasi Industri.**

Berdasar jenis bahan baku yang digunakan, industri diklasifikasikan menjadi 3, yaitu :

1. *Industri dasar (Industri Hulu),*

Dirinci menjadi *Industri Kimia Dasar* dan *Industri mesin dan Logam dasar*. Industri ini padat modal, berskala besar, berteknologi tinggi, dan lokasinya selalu dipilih yang terdekat dengan sumber daya alam (sumber bahan bakunya) yang notabeneanya terletak di lokasi yang belum tersentuh pembangunan. Oleh karena itu, tahapan perencanaan hingga operasional dari industri hulu harus direncanakan secara matang. Pembangunan industri ini akan mengakibatkan perubahan lingkungan baik dari aspek sosial (tatanan sosial), budaya (tingkah laku), ekonomi (pola konsumsi), dan pencemaran (bentang alam, habitat makhluk hidup, permukaan tanah, sumber air, kemunduran kualitas udara, pengurangan sumber daya alam).

2. *Industri Hilir (Aneka Industri).*

Merupakan proses perpanjangan industri hulu, yakni mengolah bahan setengah jadi menjadi barang jadi dengan menerapkan teknologi madya. Lokasinya pada umumnya dekat dengan pasar.

3. *Industri Kecil*

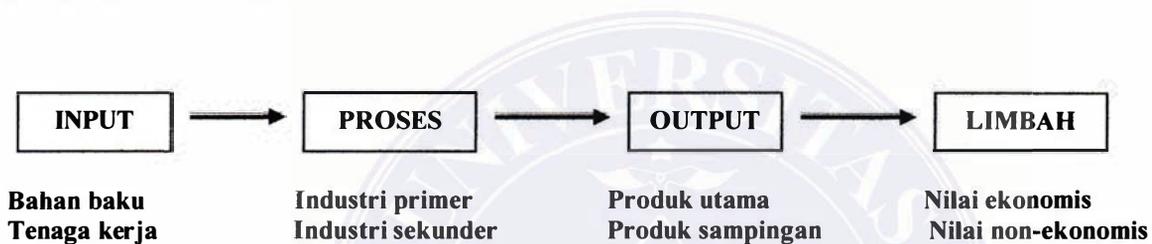
Industri ini banyak berkembang di perkotaan atau pedesaan, dilaksanakan dengan teknologi yang relatif sederhana. Sistem tata letak pabrik dan pengelolaan limbahnya biasanya belum diperhatikan dengan seksama.

Selain diatas, penggolongan industri juga dapat dibedakan menjadi 3 yakni:

1. *Industri primer*, industri yang mengubah bahan mentah menjadi bahan setengah jadi. Termasuk kelompok ini adalah pengolahan hasil pertanian, perkebunan, pertambangan, dan obat-obatan.
2. *Industri sekunder*, industri yang mengubah barang setengah jadi menjadi barang jadi.

3. *Industri tertier*, industri lanjutan yang mengolah bahan yang berasal dari industri sekunder, atau industri jasa.

Pada dasarnya fungsi utama industri adalah mengolah input menjadi output. Input meliputi bahan baku, bahan penolong, tenaga kerja, mesin, dan tenaga ahli. Sedangkan output industri dapat berupa produk utama, produk sampingan, dan limbah (baik yang masih bersifat ekonomis maupun non-ekonomis). Untuk mengetahui apakah suatu industri tergolong sebagai sumber pencemar lingkungan maka perlu diketahui jenis industrinya, bahan baku yang digunakan, sistem proses, dan pengolahan akhir, seperti yang digambarkan pada skema berikut ini :



Pencemaran terjadi apabila limbah dari setiap unit industri lepas dan masuk ke lingkungan sehingga mengakibatkan terjadinya perubahan kualitas lingkungan.

### **Pencemaran dan Daya Dukung Lingkungan**

Lingkungan yang terdiri dari air, tanah, udara, sungai, danau dan lautan merupakan badan penerima yang akan menyerap dan ‘mengolah’ bahan buangan sesuai dengan kemampuannya dan dengan cara yang berbeda-beda. Kemampuan lingkungan untuk memulihkan diri sendiri karena interaksi pengaruh luar disebut *daya dukung lingkungan (carrying capacity)*. Faktor utama yang mempengaruhi daya dukung lingkungan ini adalah komponen di dalam lingkungan itu sendiri (biotik dan abiotik).

Proses pemulihan secara alami ke keadaan semula disebut *self-purification (selfpurifikasi)*. Cara ini menunjukkan bahwa alam sebenarnya memiliki mekanisme pengaturan sendiri dan prosesnya berjalan secara arif sehingga keseimbangan lingkungan terus terjaga. Masalahnya adalah jika pengaruh luar itu bersifat kontinyu dan akumulatif sementara kemampuan menetralisasi keadaan berjalan sangat lamban maka badan

penerima tidak mampu lagi memulihkan keadaan. Kuantitas bahan pencemar yang masuk bertambah sehingga tidak ada lagi kemampuan menetralkan keadaan, kondisi demikian berarti telah melampaui daya dukung lingkungan, maka perubahan lingkungan tidak akan terhindarkan lagi. Jadi, antara daya dukung lingkungan, kualitas lingkungan dan kualitas/kuantitas limbah terdapat hubungan erat yang terkait satu sama lainnya. Faktor yang mempengaruhi kualitas limbah antara lain adalah volume limbah, bahan pencemar yang terkandung di dalamnya, dan frekuensi pembuangan limbah. Sedangkan faktor yang menentukan kualitas lingkungan adalah kualitas air, kepadatan penduduk, flora dan fauna, kesuburan tanah.

Apabila bahan pencemar lepas ke dalam lingkungan, maka dengan sendirinya lingkungan akan memberikan reaksi. Bentuk reaksi itu sendiri kemungkinannya ada tiga:

1. Lingkungan tidak mendapat pengaruh yang berarti, jika volume limbah kecil dan parameter pencemarnya sedikit dengan konsentrasi rendah.
2. Ada pengaruh perubahan kualitas lingkungan tetapi tidak sampai menimbulkan pencemaran, yakni jika lingkungan mampu memberikan toleransi terhadap pencemar tertentu tanpa menimbulkan dampak negatif.
3. Memberi perubahan dan menimbulkan pencemaran. Bahan pencemarnya belum tentu bervolume besar, tetapi mampu menimbulkan perubahan lingkungan badan penerima dengan derajat rehabilitasi yang relatif lama. Limbah yang demikian dikelompokkan kedalam jenis limbah yang toksik bagi lingkungan biotik maupun abiotik.

Bahan pencemar yang dilepaskan oleh industri sangat bervariasi kandungannya. Hal ini tergantung pada jenis sumber daya alam yang digunakan, proses produksinya, dan bahan buangan ekonomis/non ekonomis yang dibuang. Beberapa jenis industri tertentu telah dapat diprediksikan jenis pencemarnya, antara lain :

1. Pabrik kertas dan pulp: BOD, COD, SS, NH<sub>3</sub>, DS.
2. Pabrik daging: BOD, DS, SS, N, NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, P, bakteri, O dan G.
3. Pabrik pengolahan susu: pH, BOD, COD, DS, SS.
4. Penggilingan biji-bijian: BOD, SS, pH, DS, N, L, panas.
5. Pengawetan dan pengalengan sayuran: BOD, SS, pH.
6. Pengawetan dan pengalengan makanan laut: BOD, COD, SS, DS, Coliform, Cl.

7. Proses pembuatan gula tebu: BOD, COD, SS, DS, Coliform, NH<sub>3</sub>, pH, panas.
8. Pemintalan tekstil: BOD, COD, DS, warna, SS, Cu, Cr, Zn, O dan G.
9. Pabrik semen: DS, SS, pH, panas.
10. Pabrik pakan ternak: BOD, DS, SS, NO<sub>2</sub>, P, Coliform.
11. Penyepuhan logam: Cr, Zn, Ni, Cd, pH, DS, SS.
12. Pabrik kimia organik: O<sub>n</sub>, BOD, COD, SS, pH, panas, dan logam berat.
13. Pabrik kimia anorganik: BOD, DS, COD, pH, panas.
14. Pengolahan bahan sintesis dan plastik: BOD, COD, SS, logam berat, pH.
15. Pabrik sabun dan deterjen: BOD, COD, SS, O dan G.
16. Pabrik pupuk: pH, P, F, Cd, As, V, U, N, O, NO<sub>3</sub>.
17. Pengolahan minyak bumi: O, S, fenol, NH<sub>3</sub>, O, SS, logam berat, DS, panas, pH.
18. Industri logam selain besi: BOD, SS, DS, COD, CN, pH, warna, kekeruhan, logam berat, P, N, O, G, panas.
19. Pabrik pembangkit tenaga uap: BOD, SS, DS, COD, pH.
20. Industri pengolahan besi: SS, Cr, Mn, O, Fenol, PO<sub>4</sub>, Cn.
21. Penyamakan kulit: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, amine, Cr, O dan G.
22. Pabrik asbes dan gelas: NH<sub>3</sub>, pH, kekeruhan, panas, fenol, BOD, COD, DS, warna, SS, O dan G.
23. Pabrik karet: BOD, N, warna, Cl, S, O, G, fenol, Cr.
24. Industri perkayuan: BOD, COD, SS, DS, warna.

Parameter bahan pencemar yang disebutkan diatas tersebut merupakan indikator pencemaran secara fisik, kimia, maupun biologi. Gangguan yang ditimbulkan oleh bahan pencemar fisik, kimia maupun biologis dapat langsung toksik bagi manusia dan makhluk hidup lainnya, maupun lingkungan penerimanya.

Padatan terlarut yang banyak dijumpai dalam limbah cair adalah karbonat, bikarbonat, dan hidroksida. Unsur ini akan mempengaruhi langsung terhadap kualitas air. Sedangkan padatan tidak larut menyebabkan air berwarna keruh, sehingga penetrasi sinar matahari tidak mampu menembus ke dalam air. Keadaan ini dapat mengganggu keseimbangan hidup biota perairan. Tingginya kandungan padatan terlarut, tersuspensi maupun terendap akan menimbulkan pendangkalan dan merangsang pertumbuhan

tanaman air tertentu yang justru akan menjadi racun bagi makhluk hidup lainnya yang tinggal dalam komunitas tersebut.

Senyawa alkalin dalam limbah akan bereaksi dengan koagulan sehingga memungkinkan lumpur cepat mengendap (menyebabkan mudah terjadinya efek pendangkalan badan air). Selain itu, kesadahan air yang tinggi akibat hadirnya unsur Mg, Ca, Sr dan Ba dari limbah akan bereaksi membentuk garam-garaman. Kesadahan ini menyebabkan air sukar berbuih, sehingga fungsi air untuk mencuci menjadi tidak layak lagi.

Gas-gas yang terlarut dalam air ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) menyebabkan pH badan air berubah menjadi asam sehingga bersifat korosif. Sedangkan Sulfida dapat menyebabkan air berwarna keruh, hitam dan berbau. Bau yang disebabkan oleh limbah beracun dapat mengganggu sistem respirasi hewan dan tumbuhan. Gas dapat juga terjadi dari hasil perubahan limbah padat/cair akibat adanya suhu tinggi. Campuran gas dan partikel, seperti debu asbes, semen, belerang, debu batubara, asap pembakaran, uap air, uap amoniak dapat menimbulkan gangguan kesehatan langsung bagi manusia dan hewan. Gas  $\text{NO}_x$  dari tanur maupun dari industri minyak bumi akan berpengaruh terhadap tanaman dan menghambat pertumbuhannya. Gas fluorine dapat langsung masuk ke dalam daun-daunan menjadikan daun berwarna kuning kecoklatan sehingga fotosintesa menurun. Binatang yang memakan daun tersebut dapat menyebabkan penyakit gigi rontok. Gas  $\text{SO}_2$  merusak tanaman yakni daun menjadi kuning kecoklatan atau berbintik-bintik.. gas ini juga menyebabkan pembentukan kabut, sehingga fotosintesa tanaman secara umum terganggu. Ozon ( $\text{O}_x$ ) dapat merusak daun tanaman, dan melunturkan warna.

Temperatur limbah akan mempengaruhi kecepatan reaksi kimia serta tata kehidupan di dalam air. Perubahan suhu menunjukkan aktivitas kimiawi-biologi pada benda padat dan gas dalam air. Pada suhu tinggi, pembusukan berlangsung lebih intensif dan proses oksidasi bahan organik semakin besar.

Lemak (grease) dan minyak (oil) ditemukan mengapung di atas permukaan air, meskipun sebagian kadang dijumpai di bawah permukaan air. Kedua jenis bahan limbah ini sukar didegradasi oleh bakteri, tetapi dapat dihidrolisa oleh alkali sehingga terbentuk senyawa sabun yang dapat larut. Kehadiran minyak dan lemak akan merintang proses

biologis dalam badan air sehingga mengganggu fotosintesa, jika keadaan berkelanjutan maka biota air lainnya berada dalam bahaya.

Limbah padat yang ditimbun di permukaan tanah menyebabkan kontaminasi pada badan air disekitarnya, sehingga kualitas airnya menurun. Timbunan limbah padat dapat membusuk sehingga mencemari udara sekitarnya, atau dapat juga terbakar sehingga menciptakan gas-gas hasil pembakaran di udara, misalnya  $SO_2$ , CO,  $NO_x$ , yang justru merupakan sumber pencemar baru. Limbah padat dapat diolah lebih dahulu untuk mengurangi daya cemar, antara lain dibuat kompos, dipisah-pisahkan sesuai jenisnya untuk didegradasi dengan cara yang berbeda-beda, atau dipadatkan dalam bentuk briket sehingga dapat dimanfaatkan ulang atau langsung dibakar pada tanur pembakaran.

Pencemaran lingkungan jelas berakibat terhadap kesehatan manusia, tata kehidupan, pertumbuhan flora dan fauna yang berada terutama dalam jangkauan pencemaran. Gejala pencemaran dan akibatnya dapat dilihat pada jangka waktu singkat (akut) atau jangka waktu panjang (kronik), terutama pada tingkah laku dan pertumbuhan makhluk hidup. Pencemaran dalam waktu relatif singkat akibatnya dapat dirasakan dalam waktu seminggu hingga satu tahun. Umumnya keadaan ini dapat segera diatasi dengan mengurangi atau menghilangkan sumber utama pencemarnya. Sedangkan dalam jangka panjang akibatnya dapat dilihat setelah mencapai 20 tahun atau lebih.

Bahan pencemar yang terdapat dalam limbah industri ternyata telah memberikan dampak yang serius yang mengancam satu atau lebih unsur lingkungan. Polutan industri sebagai toksikan menjadikan unsur-unsur lingkungan mengalami perubahan dan mengancam kehidupan di berbagai habitat. Tanaman yang semula hidup subur, lama kelamaan akan gersang dan mati kemudian digantikan oleh unsur tanaman lain. Jenis binatang tertentu yang semula populasinya wajar, kemudian akan menurun, langka, dan kemudian menghilang atau bermigrasi ke tempat yang dianggap lebih cocok. Demikian juga dengan kondisi kesehatan manusia, yakni akan mengalami penurunan kualitas hidup, timbul penyakit baru, dan menurunkan lifespan.

### **BAB XIII. SAMPAH PLASTIK**

Plastik merupakan bahan serbaguna yang mudah dijumpai di mana saja. Apakah itu sebagai kantong (tas plastik, kantung beras dll), sebagai alat, mainan anak, ataupun sebagai sampah. Plastik memiliki banyak keistimewaan karakter. Lentur, tembus pandang, tidak berpori, bisa sangat tipis, tahan air, tidak berkarat, anti keropos, mudah dibentuk, tidak menghantarkan panas maupun listrik (isolator), ringan dll. Karena karakter istimewa inilah, maka plastik banyak digunakan pada industri perlistrikan (isolator), industri mainan anak (mudah dibentuk dan ringan), untuk rangka dan casing televisi dan komputer, sampai untuk bungkus es dan kantong plastik. Singkat kata, plastik telah menyerbu segala penjuru kehidupan manusia. Dalam perkembangannya plastik telah berhasil mengambil alih fungsi daun maupun kertas sebagai pembungkus. Bahkan uang kertas pecahan seratus ribu sudah berbahan dasar plastik. Beberapa fungsi besi dan kacamata dapat digantikannya. Pada tahun 60-an, alat suntik dokter terbuat dari tabung kaca dengan jarum suntik dari bahan logam. Sekarang, baik tabungnya maupun jarumnya, sudah berbahan dasar plastik. Pemakaian PVC sebagai bahan pipa leding adalah contoh lainnya. Pipa besi atau aluminium, selain berat dan mudah berkarat juga agak susah diolah, sedangkan dengan PVC, selain ringan, tidak berkarat juga lebih mudah diolah. Konon, industri mobil di negara maju telah mengembangkan teknologi plastik sebagai bahan dasar bodi mobil. Sehingga mobil masa depan akan semakin ringan, dan lebih tahan lama karena tidak berkarat. Singkat kata, keunggulan plastik dibanding bahan lain telah menjadikannya bahan favorit. Para ibu lebih senang berbelanja memakai tas plastik karena ringan, mudah dilipat dan praktis. Sedangkan para eksekutif muda lebih senang menggunakan tas 'echolac' yang berbahan plastik daripada memakai koper besi. Plastik telah menjadi bagian hidup manusia. Lalu, apa lagi yang dirisaukan????

Kemajuan teknologi industri membuat plastik semakin merasuki kehidupan manusia. Karena semakin mudah dan murah, maka plastik lebih sering digunakan dengan cara disposable. Sekali pakai, langsung buang. Para ibu akan lebih senang mengambil tas plastik yang baru (karena sangat murah) daripada mencuci tas yang sudah dipakai. Plastik es adalah bahan yang hanya dapat dipakai sekali saja, langsung dibuang.

Akibatnya, sampah plastik berserakan dimana-mana, mengganggu estetika dan menambah kesan kumuh. Di tempat-tempat pembuangan akhir sampah, tumpukan plastik menghalangi penetrasi oksigen, sehingga sampah organik terurai secara anaerob dan menimbulkan bau yang sangat menyengat, sekaligus menyuburkan berbagai bakteri anaerob yang berbahaya. Bau busuk yang menyengat ini mengundang datangnya lalat untuk bertelur dan berkembang biak, dan dengan bantuan lalat inilah bakteri menyebar ke lingkungan sekitarnya. Penyakit diare, tipus dan beberapa lainnya akan dengan mudah menyebar dengan perantara lalat. Jadi, walaupun secara langsung plastik itu aman, tetapi dengan jumlah sampah plastik yang terus meningkat akan menimbulkan dampak negatif yang tidak kecil.

Tempat-tempat pembuangan akhir sampah selalu dipenuhi oleh plastik berbagai jenis dan warna. Komposisi sampah yang bercampur dengan plastik cenderung sulit diolah. Selain menghalangi penetrasi oksigen, lapisan sampah plastik juga menahan uap air dari sampah organik, sehingga sampah cenderung basah dan sulit dibakar. Jika dilakukan penimbunan sampah, maka sampah plastik ini akan sangat lama terurai. Waktu paruh plastik adalah 85 tahun. Artinya, jika kita menimbun sejumlah plastik dalam tanah, maka 85 tahun kemudian, jumlah sampah itu baru berkurang setengahnya. Bayangkan, apa yang akan terjadi jika penimbunan sampah dipaksakan, maka akan terjadi lapisan plastik dibawah tanah. Mengingat plastik tidak berpori, maka akan terhalang proses penetrasi, oksigenasi dan evaporasi dalam tanah. Selanjutnya akan mengurangi kesuburan dan porositas tanah.

Sampah plastik saat ini sudah menimbulkan kekhawatiran para ekolog dan pemerhati lingkungan karena kuantitas dan waktu paruhnya. Sementara itu, Jepang memproduksi sampah plastik sebanyak 15 juta ton pertahun. Belum lagi dari Korea dan negara maju lainnya. Semua produk plastik pada gilirannya akan menjadi sampah dan menunggu untuk diperhatikan.

### **XIII.1. Pengolahan sampah plastik.**

Pengolahan sampah plastik, saat ini menjadi penting mengingat kecenderungan menumpuknya sampah plastik. Berbeda dengan sampah jenis lain, sampah plastik sangat persisten. Besi dan logam lainnya akan terurai jika ditimbun dalam tanah selama 2-4

tahun. Sedangkan sampah plastik yang ditimbun dalam tanah baru akan berkurang separuhnya setelah 85 tahun. Oleh karena itu, dewasa ini, proses pengolahan sampah plastik dikembangkan secara intensif. Jepang adalah salah satu negara yang bisa dibilang sukses dalam mengkomersialkan daur ulang sampah plastik.

Ada 3 macam cara pengolahan sampah plastik yang terus dikembangkan saat ini.

1. *Sampah plastik diolah menjadi BBM (bahan bakar minyak)*. Cara ini ditemukan tahun 70-an, pada saat era krisis minyak bumi. Saat itu, para ilmuwan dipacu untuk menciptakan BBM dari segala macam sumber daya. Salah satu hasil yang sukses adalah pembuatan BBM dari sampah plastik yang bisa didapat dengan cara pemanasan pada suhu tinggi ( $823^{\circ}\text{K}$  atau lebih). Dari pemanasan ini didapat BBM yang mengandung 1-olefin dan sejumlah rantai karbon. Namun, BBM ini tidak praktis karena mudah teroksidasi menjadi senyawa lain yang justru tidak berguna. Mulai tahun 80-an, katalisasi plastik menggunakan asam atau basa kuat mulai banyak dilakukan. Hasilnya adalah BBM dengan sedikit kandungan olefin dan rantai karbon yang lebih pendek. BBM ini sudah mulai dikomersialkan.
2. *Sampah plastik didaur ulang*. Yaitu dengan mengolah kembali sampah plastik menjadi barang atau peralatan. Tentu saja kualitas plastik daur ulang ini lebih rendah, tetapi jelas lebih baik daripada membiarkannya sebagai sampah yang mengganggu. Plastik dicuci dan dihancurkan menjadi kepingan kecil dan dilelehkan untuk selanjutnya dibentuk menjadi barang yang diinginkan.
3. *Daur ulang khemis*. Yaitu mendaur ulang sampah plastik kembali menjadi bahan dasar plastik. Sebuah perusahaan raksasa, Du Pont, telah mengembangkan teknik dekomposisi PET (polyethylene terephthalate) menjadi etilen glikol dan dimetil terephthalate, yang dapat digunakan kembali untuk membuat resin PET murni. Cara ini dianggap sangat ideal karena dapat mengembalikan sampah plastik menjadi bahan dasarnya.

Diluar cara itu memang masih ada beberapa cara mengolah sampah plastik lainnya. Misalnya, sampah plastik lembaran digunakan untuk menutupi lantai dasar sawah, sehingga pupuk dan unsur hara lainnya tidak merembes ke dalam tanah sehingga dapat mengurangi pemakaian pupuk. Pernah juga terdengar pengolahan sampah plastik

menjadi batu bata, namun sampai saat ini belum terdengar lagi lanjutan kisahnya. Pada hakekatnya, bagaimanapun sampah plastik harus ditangani, karena kecenderungan akumulasinya yang sangat besar.

## **BAB XIV.PENCEMARAN UDARA**

Pencemaran udara merupakan salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam mencapai pembangunan berwawasan lingkungan. Studi mengenai pencemaran udara merupakan studi yang mengaitkan antara udara atau atmosfer sebagai sumber daya alam tak dapat diperbarui dengan kepentingan manusia, hewan dan tumbuhan untuk mempertahankan hidupnya. Studi semacam ini diperlukan karena langsung atau tak langsung pencemaran akan menurunkan kualitas udara.

Pencemaran udara adalah masuknya zat pencemar ke dalam atmosfer, dalam jumlah yang melebihi ambang batas yang masih diperkenankan untuk kesehatan dan kehidupan manusia, hewan dan tumbuhan. Zat pencemar dalam hal ini dapat berupa partikel halus yang mengambang di udara (aerosol), debu, asap, atau gas beracun sebagai hasil samping dari produk industri atau aktivitas manusia, atau oleh alam.

Menurut asalnya, pencemaran udara dapat dikategorikan menjadi:

1. *Pencemaran udara alami*, yakni masuknya zat pencemar ke dalam atmosfer sebagai akibat proses alam, misalnya kebakaran hutan, debu gunung berapi, debu meteorit, dan sejenisnya.
2. *Pencemaran udara non-alami*, yaitu masuknya bahan pencemar secara sengaja atau tidak disengaja ke dalam atmosfer akibat aktivitas manusia. Misalnya, buangan nuklir, limbah gas atau suara, atau senyawa kimia.

Berdasar sumber pancaran (*emisi*) polutan, kita dapat menggolongkannya menjadi 3 kelompok, yaitu :

1. *Sumber polutan tunggal kontinyu*. Sumber polutan ini dipancarkan ke atmosfer oleh satu atau lebih pabrik-pabrik baik melalui cerobong asap (tanur) atau langsung dan berlangsung secara rutin.
2. *Sumber polutan garis*. Sumber polutan ini dipancarkan dari kendaraan bermotor yang bergerak, atau dari deretan industri di sepanjang jalan atau sungai.

3. *Sumber polutan bidang atau area.* Sumber polutan ini bersifat kompleks dan dipancarkan dari suatu daerah seperti kawasan industri atau perkotaan.

Setiap polutan yang dipancarkan ke atmosfer akan mengalami : pengangkutan (transportasi), pencampuran (pengenceran, difusi), penyebaran (dispersi), perubahan kimiawi, konduksi, konveksi, radiasi, pergerakan, gesekan dan gradien tekanan.

Parameter yang mempengaruhi pancaran polutan ke atmosfer antara lain: kapasitas produksi polutan per detik (rate pancaran dalam ukuran gram atau mikrogram per detik), kecepatan pelepasan efluen (m/dtk), suhu, tinggi fisik pancaran polutan, macam sumber pancaran/emisi, tipe dan ukuran lubang emisi (luas atau diameter), dan teknologi penyaringan polutan yang digunakan.

Penyebaran polutan di atmosfer sangat tergantung pada : suhu ambang batas, derajat perubahan suhu, arah angin, kecepatan angin (setiap jam), dan iklim lokal (fluktuasi datanya harus didapat dari perubahan selama 11 tahun terakhir, atau 30 tahun terakhir untuk siklus iklim). Sedangkan transportasi atau penyebaran polutan di atmosfer dapat berlangsung karena distribusi materinya belum merata ke seluruh titik ruang atmosfer. Proses penyebaran baru akan berakhir kalau “*kesetimbangan mekanik*” tercapai. Pola proses sebaran ini mengikuti pola :

1. *Gerak Brown.* Yakni apabila ukuran partikel materi yang tersebar lebih besar daripada ukuran partikel pada mediumnya.
2. *Proses difusi.* Yakni apabila ukuran partikel materi yang tersebar lebih kecil daripada ukuran partikel mediumnya. Proses difusi ini sendiri dapat dibedakan menjadi dua, yakni:
  - a. *Difusi molekuler.* Penyebarannya berlangsung semata-mata karena kesetimbangan mekanik belum tercapai.
  - b. *Difusi turbulen.* Penyebarannya berlangsung selain disebabkan belum tercapainya kesetimbangan mekanik, juga dikarenakan mediumnya bergerak secara fluktuatif.

Berdasar peristiwa terjadinya pencemaran udara, maka kita dapat mengelompokkannya dalam 3 episode, yakni:

1. *Episode induksi atmosferik.* Yakni penumpukan polutan sebagai fungsi waktu, topografi, iklim mikro daerah penerima pencemar (atau cekungan).

Udara di lembah pada malam hari mengalami inversi (kenaikan suhu terhadap pertambahan altitude), sehingga atmosfer di daerah lembah cenderung stabil dan tidak mampu mendifusikan polutan. Sedangkan pada siang hari, kondisi aerodinamik atmosfer menyebabkan udara tak mampu terangkat. Konsekuensinya, lembah merupakan daerah cekungan tempat akumulasinya polutan dari waktu ke waktu, sehingga konsentrasi pencemarnya cenderung berada diatas nilai ambang batas. Area semacam ini disebut “jebakan maut” atau *lembah maut*.

2. *Episode sumber tunggal*. Yakni penumpukan polutan yang berasal dari sumber kontinyu, baik tunggal maupun ganda yang dipancarkan melalui cerobong dan diangkut serta didifusikan oleh faktor angin, suhu, dan stabilitas atmosfer. Penumpukan polutan ini dapat terjadi pada daerah penerima secara tetap dan kontinyu.
3. *Episode kecelakaan*. Penumpukan polutan akibat kecelakaan. Prediksi terhadap efek dari kecelakaan ini harus didasarkan pada data arah angin, kecepatan angin, fluktuasi suhu, serta variabel tetap dan variabel berubah lainnya yang ada sebelumnya, sehingga radius berat ringannya area yang akan terkena dampak dapat diperkirakan.

Sebenarnya, atmosfer memiliki kemampuan *homeostasis* dan *self purification*, yaitu kemampuan mengatur dan mengendalikan diri terhadap masuknya polutan. Namun, secara alami atmosfer memiliki keterbatasan dalam menerima polutan udara. Jika daya dukung lingkungan udara (ambang batas) terlampaui, maka dampak negatif berupa perubahan kualitas dan karakteristik udara akan muncul yang diwujudkan dalam bentuk perubahan iklim lokal atau global. Untuk itu perlu dipertimbangkan adanya faktor yang berperan dalam pengendalian tadi yaitu *faktor meteorologi* yang meliputi :

1. *Angin*. Memegang peranan dalam transportasi zat pencemar.
2. *Turbulensi*. Berupa *profil angin* (gambaran mengenai perubahan arah dan kecepatan angin rata-rata terhadap perubahan ketinggian mulai dari 20-50 m hingga 500-1000 m dari permukaan tanah) dan profil suhu yang berfungsi mengencerkan polutan atau mendifusikan zat pencemar.

3. *Hujan*. Membantu melakukan pencucian atmosfer. Proses pencucian ini tentunya sangat tergantung pada suhu dan kelembaban (iklim lokal) dari daerah sumber pencemar atau daerah penerima pencemar.

#### **XIV.1.KOMPONEN PENCEMAR UDARA**

Polutan yang diemisikan ke atmosfer umumnya dapat digolongkan ke dalam 2 bentuk, yaitu gas dan partikel (padatan yang sangat halus).

Partikel udara dapat dikelompokkan lagi menjadi beberapa jenis berdasar ukuran, antara lain :

1. *Grit (debu kasar)*, berupa partikel padat di udara dengan diameter lebih dari 500  $\mu\text{m}$ .
2. *Dust (debu halus)*, partikel padat dengan ukuran antara 0,25 – 500  $\mu\text{m}$ .
3. *Smoke (asap)*, merupakan partikel (berukuran 2  $\mu\text{m}$ ) yang bercampur dengan gas.
4. *Fumes (asap dan gas)*, merupakan partikel berukuran 1  $\mu\text{m}$  yang bercampur dengan gas dari proses kimiawi, dan mengandung logam.
5. *Mist (kabut tipis)*, berupa titik-titik air di udara dengan diameter partikel 2,0  $\mu\text{m}$ .
6. *Aerosol*, berupa partikel padat (solid) atau cair (liquid) dengan diameter kurang dari 1,0  $\mu\text{m}$ , dan biasanya bercampur dengan gas.

Partikel dengan diameter lebih dari 50  $\mu\text{m}$  umumnya relatif masih dapat dilihat, dan cepat mengendap. Partikel ini dianggap tidak terlalu berbahaya karena durasi pencemarannya tidak terlalu lama. Namun hasil endapan partikel ini dapat menjadi berbahaya karena mencemari tanah dan air.

Partikel berdiameter antara 10-50  $\mu\text{m}$  cenderung kurang dapat dilihat dan dapat berada di atmosfer selama jangka waktu tertentu, misalnya: 6-14 hari (di lapisan troposfer bawah), 2-4 minggu (di lapisan troposfer atas), 6 bulan (di lapisan stratosfer bawah), dan 5-10 tahun di lapisan mesosfer. Polutan yang berada di lapisan troposfer atas hingga ke lapisan mesosfer dapat mengadakan reaksi khemis bila terkena radiasi matahari (reaksi fotokimia), sehingga polutan primer dapat berubah menjadi polutan sekunder yang lebih berbahaya.

Partikel berdiameter kurang dari 10  $\mu\text{m}$  dapat ikut terkondensasi bersama dengan awan dan terbawa bersama presipitat pada saat hujan. Partikel semacam ini sering menimbulkan hujan asam.

Pencemaran atmosfer umumnya terjadi di lapisan troposfer dan stratosfer bawah. Partikel dengan diameter 0,1-1,0  $\mu\text{m}$  dapat tertahan di lapisan tersebut hingga ketinggian 18 km. Pada ketinggian 1-100 m, udara biasanya dalam kondisi sangat tercemar, terutama di lokasi yang padat penduduknya. Namun pencemaran ini dapat diabsorpsi oleh vegetasi, gedung-gedung, dan permukaan air. Sehingga, rata-rata 33% bahan pencemar dapat direduksi.

Pada ketinggian 100-500 sampai 2000 m, polutan akan tercampur dengan bahan lain yang ada di udara, dan masih dapat tercuci oleh hujan atau kabut. Di lapisan tropopause (ketinggian 2-12 km), polutan dapat bercampur dengan uap air atau awan sehingga menjadikannya komponen utama dari tiap tetes air yang terbentuk. Polutan inipun masih dapat tercuci oleh hujan atau tetap stabil di tempatnya. Jika ada sinar UV, polutan di lapisan ini dapat mengalami perubahan fotokimiawi.

Pada ketinggian diatas 12 km, polutan di stratosfer masih dapat turun ke lapisan troposfer, namun biasanya jarang terjadi karena polutan yang terfotokimia cenderung menetap untuk jangka waktu lama, atau dapat bergeser tempatnya namun masih di lapisan yang sama. Misalnya, polutan  $\text{SO}_2$  di stratosfer hasil dari letusan gunung berapi di Eropa dapat bergerak sampai ke Afrika atau Scandinavia.

Polutan yang berada di ketinggian troposfer masih mungkin untuk dianalisis kandungannya, perubahan kimiawinya, penyebaran, pelarutan, dan kemungkinan jatuhnya ke permukaan bumi, serta efek jangka pendek dan panjangnya.

Sumber utama polutan udara pada umumnya adalah proses penambangan dan pembakaran dari berbagai jenis bahan bakar, atau dari proses perubahan satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Misalnya :

1. *Batubara*. Konversi batu bara menjadi energi lain menghasilkan produk samping berupa asap, debu, gas beracun dan senyawa oksida ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$ ).
2. *Minyak bumi*. Memberikan kontribusi besar pada pencemaran udara melalui pembakaran tidak sempurna yang di atmosfer membentuk senyawa oksida.

3. *Gas bumi*. Potensi pencemarannya tidak terlalu besar, akan tetapi pada keadaan tertentu menimbulkan peracunan.
4. *Geotermal*. Dampak yang ditimbulkan berupa peningkatan konsentrasi gas dan mineral tinggi serta pelepasan energi panas ke atmosfer.
5. *Energi nuklir*. Memiliki potensi mencemari lingkungan yang sangat besar apabila pengelolaannya tidak dilakukan dengan hati-hati. Untuk itu, sejak awal penambangan, pemrosesan, pemanfaatan hingga ke pembuangan harus dilakukan pengawasan ketat sehingga efek radiasinya dapat dikendalikan.
6. *Sumber daya energi yang dapat diperbarui*. Potensi polutannya berasal dari prosesing bahan baku menjadi bahan pakai, bentuk polutannya adalah senyawa oksida.
7. *Sistem tenaga listrik*. Bahan bakunya berupa air, BB fosil, angin atau nuklir yang menghasilkan produk samping berupa asap, debu dan panas.
8. *Sistem distribusi energi panas*. Potensi polutannya relatif rendah. Pencemaran serius baru muncul apabila terjadi kecelakaan dalam proses pendistribusiannya.
9. *Sistem pemanfaatan energi*. Sumber polutannya adalah sisa energi tak terpakai yang dibuang ke udara dalam bentuk panas, senyawa oksida, asap, debu dan partikel halus lainnya.

## **XIV.2.DAMPAK NEGATIF PENCEMARAN UDARA**

Konsentrasi polutan yang tinggi yang terakumulasi di lapisan tertentu dapat menimbulkan dampak negatif. Misalnya :

1. *Asap atau asap gas* : meningkatkan turbiditas udara, mengganggu jarak pandang (visibilitas), mengurangi radiasi matahari ke bumi (partikelnya mengabsorpsi dan memantulkan radiasi matahari ke angkasa luar). Hal ini telah terjadi di Amerika Serikat (turbiditas meningkat 57% selama 60 tahun terakhir) dan di Switzerland (turbiditas meningkat 88% selama 30 tahun terakhir).
2. *Partikel-partikel padat hasil aktivitas manusia dan peningkatan evaporasi perairan* : ikut membentuk awan yakni meningkat 10% lebih banyak dari normal dengan akibat berupa musim hujan lebih panjang, banyak kabut, asap dan smog.
3. *Partikel, asap dan gas* : terbawa oleh hujan dan terdeposit di tanah, gedung atau atap bangunan sehingga menimbulkan korosi gedung maupun logam, serta menurunkan hasil panen (merusak stomata daun).

Substansi kimia yang dibuang ke atmosfer disebut dengan istilah polutan primer. Jika polutan ini bereaksi dengan air, oksigen dan sinar UV, maka dapat berubah menjadi polutan sekunder. Sebagai contoh :

| <b>POLUTAN PRIMER</b> | <b>REAKSI FOTOKIMIA</b>                              | <b>POLUTAN SEKUNDER</b>            |
|-----------------------|--|------------------------------------|
| SO <sub>2</sub>       | SO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → ASAM SULFUR     | ASAM SULFAT                        |
|                       | ASAM SULFUR + O <sub>2</sub> →                       |                                    |
|                       | SO <sub>2</sub> TEROKSIDASI LAMBAN → SO <sub>3</sub> |                                    |
| NO <sub>2</sub>       | SO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O →                 | ASAM SULFAT                        |
|                       | NO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → ASAM NITROUS    | ASAM NITRIT                        |
|                       | ASAM NITROUS + H <sub>2</sub> O →                    |                                    |
| CO <sub>2</sub>       | CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O →                 | ASAM KARBONAT                      |
| H <sub>2</sub> S      | DIOKSIDASI →   | SO <sub>2</sub>                    |
| HF                    | HF + H <sub>2</sub> O →                              | ASAM HIDROFLORAT                   |
| SiF <sub>4</sub>      | SiF <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O →                | ASAM HIDROFLORAT + SO <sub>2</sub> |

#### **XIV.3.Efek Pencemaran Udara Terhadap Biosfer.**

Baik polutan primer maupun sekunder dapat menimbulkan dampak negatif terhadap biosfer, khususnya terhadap gedung-gedung dan material bangunan, tanah, vegetasi, tanaman pertanian, kehidupan binatang, atau bahkan manusia sendiri.

Polutan gas di udara ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{F}$ ) yang bercampur dengan hujan dan terkena radiasi matahari, jika mengenai :

1. *Permukaan bangunan yang terbuat dari batu kapur dan pasir*, maka :

$\text{SO}_2$  diubah menjadi asam sulfat yang kemudian mudah bereaksi dengan  $\text{CaCO}_3$  atau  $\text{MgCO}_3$  akan menyebabkan pengerasan dan pengelupasan permukaan bangunan. Asam sulfat juga dapat merusak semen sehingga melonggarkan ikatan antar pasir, bila kemudian disusul dengan terkena hujan maka akan terjadi pengeroposan gedung.

2. *Logam*. Korosi logam secara alami dapat terjadi, akan tetapi dengan hadirnya  $\text{SO}_2$  maka proses korosi menjadi dipercepat.
3. *Material dari kapas (cotton) atau bahan pakaian berwarna*: akan menjadi mudah luntur jika terkena titik air hujan yang mengandung asam sulfat atau  $\text{SO}_2$  (hujan asam). Air hujan asam ini kerjanya setara dengan bahan pemutih (bleach). Jika sulfur teroksidasi oleh ozon menjadi asam sulfat, maka pakaian akan mudah terurai seratnya (lapuk). Sedangkan *material dari plastik* akan mudah pecah (getas) dan terkelupas.
4. *Cat gedung*: mudah pudar, retak dan mengelupas jika terkena uap  $\text{H}_2\text{S}$ .
5. *Tanaman* . Polutan udara yang terdeposit di tanah akan menurunkan pH tanah yang akan merusak pertumbuhan akar tanaman. Polutan udara yang mengandung logam berat juga mencemari tanah, jika diabsorpsi oleh tanaman dapat mengganggu kerja enzim. Daun dan cabang-cabang muda tanaman yang terekspos oleh  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  dan PANs akan mengalami kerusakan pada lapisan lilin di permukaan daun. Ini mengakibatkan daun mengalami penguapan tinggi, mudah diserang penyakit, fotosintesa terganggu, mudah menguning dan rontok sehingga tanaman menjadi kering dan mati. Selain itu, partikel-partikel udara dapat menutup stomata sehingga fotosintesa menurun karena  $\text{CO}_2$  tak mampu diserap, dan evapotranspirasi juga mengalami hambatan. Hal ini telah terjadi di California, yakni polutan  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , dan

logam berat menyebabkan matinya vegetasi seluas 260 km<sup>2</sup> dan menghambat pertumbuhan tanaman seluas 370 km<sup>2</sup>.

6. *Peternakan.* Ternak sapi mengalami kesulitan bernafas dan mati akibat menghirup smog. Cemar fluorine, Al dan bahan semen menurunkan nafsu makan, menurunkan produksi susu, limbung (oyong), dan kaku persendian.

7. *Manusia.*

SO<sub>2</sub> dan asap akan menimbulkan gangguan berupa bronchitis, pneumonia, dan sesak nafas. Selain itu, asap di atmosfer juga mengandung bahan-bahan yang bersifat karsinogenik (seperti halnya asap rokok) yang dapat memicu timbulnya kanker saluran pernafasan, pneumonia akut, TBC dan jantung. O<sub>3</sub> dari proses fotooksidasi bila terhirup menyebabkan batuk, nafas pendek-pendek, iritasi hidung dan kerongkongan, asma dan jantung. Merokok berkepanjangan akan menimbulkan emphysema (menurunnya kemampuan sel-sel darah untuk mengikat oksigen).

Berdasar data pengamatan dari AS, polutan udara telah menyebabkan 120.000 kematian per tahun dan 50.000 aborsi per tahun.

#### **XIV.4. Efek Pencemaran Udara Terhadap Troposfer.**

Udara bersih di atmosfer bumi yang selalu bergerak akan bertemu dengan berbagai polutan udara lainnya. Di lapisan troposfer materi-materi tadi akan bercampur dan bergerak baik secara horisontal maupun vertikal, dan dapat saling bereaksi satu dengan lainnya. Aliran udara yang bergerak ini akan membawa komponen tadi menyebar ke permukaan bumi dalam berbagai bentuk, antara lain partikel padat, tetes air hujan, atau ikut terlarut ketika terjadi presipitasi.

Di lapisan troposfer terdapat ratusan jenis polutan udara yang dapat dikelompokkan menjadi 9, yaitu :

1. Oksida karbon (CO dan CO<sub>2</sub>)
2. Oksida sulfur (SO<sub>2</sub> dan SO<sub>3</sub>)
3. Oksida nitrogen (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O atau NO<sub>x</sub>)
4. Senyawa organik volatil (VOCs) yakni ratusan senyawa yang mengandung unsur CH, misalnya CH<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>2</sub>O, CFCs.

5. Partikel-partikel terlarut (ribuan jenis, antara lain: debu halus, karbon, pollen, asbestos, Pb, As, Cd, garam-garam NO<sub>3</sub> dan SO<sub>4</sub>, minyak, PCB dan pestisida).
6. Oksidan fotokimia (O<sub>3</sub>, PANs, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, OH<sup>-</sup>, aldehid, formaldehid, dll).
7. Substansi radioaktif dalam bentuk gas atau partikel (Radon <sup>222</sup>, I <sup>131</sup>, Sr<sup>90</sup>)
8. Panas (dari hasil pembakaran atau perubahan bentuk suatu materi)
9. Suara (akibat aktivitas mesin, radio, dll).

Kesembilan jenis polutan tadi kebanyakan dihasilkan oleh aktivitas manusia di luar tempat tinggalnya (disebut *outdoor air pollution*). Sementara itu, didalam rumah atau gedung, pencemaran udara juga tetap hadir (disebut *indoor air pollution*). Sumbernya dari berbagai bahan, jenisnya mencapai 20-150 jenis polutan dengan konsentrasi justru lebih tinggi yakni 10-40 x lipat outdoor polutan. Indoor pollutant menjadi lebih berbahaya karena manusia lebih sering berada dalam ruangan (70-98% waktunya lebih banyak dibuang di dalam ruangan), sehingga lebih sering dan lebih lama terekspos oleh polutan. Berikut ini diuraikan beberapa contoh jenis indoor polutan dan konsekuensinya bagi manusia :

| BAHAN<br>PENCEMAR  | SUMBER PENCEMAR  | GANGGUAN YANG<br>DITIMBULKAN  |
|--|--|---|
| Chloroform<br>Para-dichlorobenzene<br>Tetrachlorine ethylene | Chlorine dari air mandi/PAM<br>Kapur barus, pewangi ruangan<br>Uap dry-clean pakaian                             | Kanker<br>Kanker pernafasan<br>Kerusakan saraf, gagal ginjal dan hati,<br>kanker  |
| 1-1-1 Trichlorethane<br>Oksida Nitrogen, CO                  | Aerosol, sprayer<br>Kompom, kompor gas, kayu bakar   | Pusing-pusing dan sesak nafas<br>Iritasi paru-paru, demam, pusing/sakit<br>kepala, irama jantung berubah                            |
| Asbes<br>Methylen klorida<br>Radon-222                       | Pipa vnyil, eternit, atap, lantai semen<br>Cat dan tinner<br>Radioaktif tanah, batu-batuan<br>fondasi, air sumur | Penyakit paru-paru, kanker paru-paru<br>Diabetes, kerusakan saraf<br>Kanker paru-paru   |
| Styrene<br>Benzo-pyrene<br>Formaldehyde                      | Karpet, produk dari plastik<br>Pembakaran kayu, asap rokok<br>Furniture, berbagai jenis busa                     | Kerusakan hati dan ginjal<br>Kanker paru-paru<br>Iritasi pada mata, kulit, saluran nafas,<br>paru-paru, dan sengau serta mual-mual. |

#### **XIV.5. Efek Pencemaran Udara Terhadap Stratosfer.**

Stratosfer sebenarnya hanya sedikit menerima cemaran dari lapisan troposfer. Pada umumnya penyebab pencemaran di lapisan ini adalah :

1. *Kegiatan penerbangan pesawat militer dan pesawat Concorde.*

Kedua jenis pesawat tersebut biasanya terbang diatas ketinggian 20 km dpl). Aktivitas penerbangan tersebut menghasilkan buangan utama berupa CO<sub>2</sub> dan uap air (tampak dari bumi berupa asap putih yang membeku bila suhu awan menurun). Selain itu juga limbah CO, NO<sub>x</sub> serta SO<sub>2</sub>, yang merangsang pembentukan awan cirrus. Bahan pencemar di stratosfer ini mampu bertahan 18 bulan, karena tidak ada pergerakan udara dan suasana atmosfer yang kering. Jika keadaan ini muncul, maka akan tercipta *green house effect* di lapisan stratosfer dengan akibat lebih lanjut berupa peningkatan suhu bumi, perubahan pola iklim, menurunnya kandungan O<sub>3</sub> (penurunan normal atau alami adalah 0,02% per tahun, sedangkan akibat buangan pesawat akan menurunkan O<sub>3</sub> menjadi 0,7% per tahun).

2. *Penggunaan aerosol dari spray, cat, pestisida dan alat kecantikan.* Bahan aerosol yang berbahaya adalah CFC (ChloroFluoroCarbon). CFC dilepaskan ke atmosfer dalam jumlah 100.000 ton per tahun. Jika CFC terfotokimia maka akan berubah menjadi klorin (chlorine) yang dapat mengurai O<sub>3</sub> dengan cepat. Oleh karena itu, penggunaan CFC harus dikurangi, dan digantikan dengan bahan alternatif lain yang ramah lingkungan, misalnya dari bahan non halogen.

Selain sebagai akibat dari aktivitas manusia, perubahan terbesar dari kandungan O<sub>3</sub> stratosfer adalah akibat dari badai matahari yang bersiklus tiap 11 tahun sekali.

#### **XIV.6. Efek Pencemaran Udara Terhadap Siklus Biogeokimia.**

Perubahan *siklus biogeokimia* dapat terjadi akibat adanya aktivitas penambahan atau pengurangan berbagai komponen kimiawi (gas) yang penting. Sebagai contoh, aktivitas yang dilakukan manusia ternyata menghasilkan CO<sub>2</sub> sebesar ¼ kali lipat dari produk CO<sub>2</sub> secara alami. Kehadiran CO<sub>2</sub> berlebih ini akan mempengaruhi *siklus C* (siklus karbon) di alam. Akibatnya : terjadi pemanasan bumi, perubahan iklim secara global, mempengaruhi produksi bahan pangan, mengganggu aliran energi di alam, pembentukan “heat island”, dan pembentukan awan debu di sekitar hunian manusia.

Contoh lain adalah terganggunya *siklus N* (siklus Nitrogen) akibat produksi NO yang meningkat 3x lipat yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil dan penggunaan pupuk N. NO ini dapat bereaksi dengan H<sub>2</sub>O di atmosfer membentuk HNO<sub>3</sub> yang kemudian kembali ke bumi dalam bentuk deposit asam (via hujan asam). Kejadian serupa juga terjadi pada *siklus S*. S yang dilepas ke atmosfer sudah mencapai 2x lipat dari keadaan normal. Akibatnya akan terbentuk H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> di atmosfer yang akan turun ke bumi bersama hujan.

Perubahan siklus biogeokimia juga dipengaruhi oleh bertambahnya jumlah polutan toksik ke alam, misalnya Arsen (meningkat 2x lipat), Cadmium (meningkat 7x lipat), dan Pb (meningkat 17 x lipat).

