

BAB 11

MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

A. MIKROBIOLOGI AIR

Air merupakan materi penting dalam kehidupan. Semua makhluk hidup membutuhkan air. Misalnya sel hidup, baik hewan maupun tumbuhan, sebagian besar tersusun oleh air, yaitu lebih dari 75% isi sel tumbuhan atau lebih dari 67% isi sel hewan. Dari sejumlah 40 juta mil-kubik air yang berada di permukaan dan di dalam tanah, ternyata tidak lebih dari 0,5% (0,2 juta mil-kubik) yang secara langsung dapat digunakan untuk kepentingan manusia. Karena dari jumlah 40 juta mil-kubik, 97% terdiri dari air laut dan jenis air lain yang berkadar-garam tinggi, 2,5% berbentuk salju dan es-abadi yang dalam keadaan mencair baru dapat dipergunakan secara langsung oleh manusia.

Kebutuhan air untuk keperluan sehari-hari, berbeda untuk setiap tempat dan setiap tingkatan kehidupan. Biasanya semakin tinggi taraf kehidupan, semakin meningkat pula jumlah kebutuhan air.

Keperluan air per kapita di negara-negara maju, jauh lebih tinggi dari keperluan di Indonesia, misalnya untuk Amerika Serikat (Chicago: 800 L, Los Angeles: 640 L), Perancis (Paris: 480 L), Jepang (Tokyo: 530 L), dan Swedia (Uppsala: 750 L).

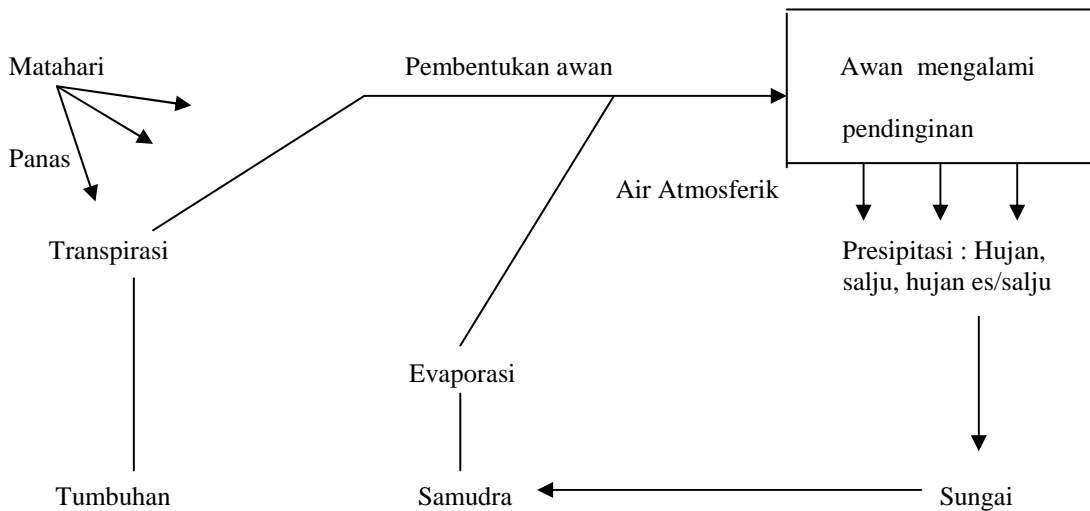
Sejalan dengan kemajuan dan peningkatan taraf kehidupan, tidak dapat dihindari adanya peningkatan jumlah kebutuhan air, khususnya untuk keperluan rumah tangga, sehingga berbagai cara dan usaha telah banyak dilakukan untuk memenuhi kebutuhan air, antara lain dengan :

- a) Mencari sumber-sumber air baru (air-tanah, air danau, air sungai, dan sebagainya);
- b) Mengolah dan mentawarkan air laut;
- c) Mengolah dan memurnikan kembali air kotor yang berada di sungai, danau, dan sumber lain yang umumnya telah tercemar baik secara fisik, kimia maupun mikrobiologis.

1. KELOMPOK AIR ALAMI

Perputaran uap air dari bumi menuju atmosfer atau sebaliknya melalui suatu proses yang disebut siklus hidrologi. Istilah ini mengacu pada aliran air ke atmosfer melalui evaporasi dari lautan dan air permukaan lain dan melalui transpirasi (evaporasi dari permukaan daun) dari tumbuhan, dan tahap presipitasi uap air di atmosfer dalam bentuk hujan, salju, dan hujan es yang jatuh kembali ke bumi (gambar 11.1). Dalam siklus ini, air alami dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori berdasarkan tempat keberadaannya, yaitu :

1. Air atmosferik : air yang terkandung dalam awan, terpresipitasi sebagai hujan, salju, dan hujan es;
2. Air permukaan : badan air seperti danau, sungai, selokan, dan lautan atau samudra;
3. Air-tanah : air di bawah permukaan tanah yang terdapat dalam keadaan jenuh dalam seluruh pori-pori tanah, juga tempat antara dan dalam batuan.



Gambar 11.1 Siklus hidrologi

Air alami tersedia sebagai habitat untuk sejumlah mikroorganisme. Mikroorganisme tersebut dapat menempati habitat air-tawar seperti danau, sungai, kolam; habitat lautan ; atau habitat estuari atau daerah antara laut dan air-tawar. Ilmu mengenai mikroorganisme dalam lingkungan air-tawar, lautan dan estuari disebut mikrobiologi akuatik.

2. LINGKUNGAN AKUATIK

Berbagai macam mikroorganisme ditemukan dalam lingkungan akuatik, penyebarluasannya ditentukan oleh faktor kimia dan fisik yang terdapat dalam lingkungan tersebut. Faktor lingkungan ini sangat berbeda satu dengan yang lainnya seperti suhu, tekanan hidrostatik, cahaya, salinitas, turbiditas, pH, dan nutrisi.

a. Temperatur

Temperatur air permukaan berkisar antara 0 °C di daerah kutub sampai 40 °C di daerah equator. Di bawah permukaan lebih dari 90% lingkungan laut memiliki temperatur di bawah 5 °C, suatu kondisi yang disukai untuk pertumbuhan mikroorganisme psikrofilik.

Sejumlah bakteri termofilik dapat diisolasi dari endapan anaerobik dekat palung pada dasar lautan. Sebagai contoh, archaeobacteria *Pyrodictium occultum*, diisolasi dari bawah laut dekat pulau Volcano, Itali, dimana air bertemperatur 103°C. Dari hasil penelitian di laboratorium, bakteri tersebut dapat tumbuh secara optimum pada temperatur 105°C dan tidak tumbuh pada temperatur di bawah 82°C. *Pyrodictium occultum* merupakan bakteri autotrof anaerobik yang tumbuh melalui pembentukan hidrogen sulfida (H₂S) dari gas hidrogen (H₂) dan unsur sulfur (S). *Pyrobaculum organotrophum*, mewakili kelompok baru archaeobacteria hipertermofilik dari laut pada bagian dunia yang berbeda. Spesies dari genus ini dapat tumbuh optimal pada temperatur 100 °C, merupakan bakteri bentuk batang Gram-negatif, anaerob sempurna, dan bergerak dengan flagela.

b. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik merupakan tekanan pada dasar suatu kolom vertikal air. Tekanan tersebut meningkat menurut kedalaman pada kisaran 1 atmosfer tekanan (14,7 lb/in²) dari setiap 10 m. Pada daerah yang sangat dalam, seperti dekat dasar lautan, tekanan hidrostatik sangat besar dan dapat menyebabkan perubahan dan mempengaruhi sistem biologik, seperti perubahan kecepatan reaksi kimia, kelarutan nutrisi, dan titik didih air.

Organisme barofilik merupakan organisme yang tidak dapat tumbuh pada tekanan atmosfer normal. Sejumlah bakteri barofilik dapat diisolasi dari parit lautan Pasifik pada kedalaman antara 1000-10.000 m. Isolasinya membutuhkan alat-alat

khusus yang memelihara tekanan tinggi pada sampel dari waktu pengambilan sampai, dan selama masa pembiakkan. Umumnya bakteri barofilik dapat tumbuh baik pada tekanan yang kurang dari tempat asalnya dan hampir seluruhnya diinkubasi pada temperatur psikrofilik (sekitar 2 °C).

c. Cahaya

Sebagian besar bentuk kehidupan akuatik bergantung (baik langsung maupun tidak langsung) pada produk metabolik organisme fotosintetik. Organisme fotosintetik utama dalam sebagian besar habitat akuatik adalah alga dan Cyanobacteria; pertumbuhannya dibatasi oleh lapisan permukaan air dimana cahaya dapat menembus. Bagian dalam air dimana terjadi fotosintesis disebut zona fotik. Ukuran zona ini berbeda bergantung pada kondisi daerah seperti posisi matahari, musim, dan khususnya kekeruhan air. Umumnya, aktivitas fotosintetik dibatasi pada kedalaman kurang dari 50-125 m badan air, bergantung pada kejernihan air.

d. Salinitas

Salinitas atau konsentrasi NaCl air alami berkisar antara 0% dalam air-tawar sampai 32% NaCl dalam danau asin seperti *the Great Salt Lake* di Utah. Air laut mengandung NaCl sekitar 2,75%; konsentrasi garam total air laut (NaCl ditambah garam lainnya) berkisar antara 3,3 – 3,7%. Di samping NaCl garam lain yang ditemukan dalam air ialah natrium karbonat, sulfat dan kalium sulfat, klorida dan karbonat, kalsium dan magnesium. Konsentrasi garam pada daerah yang dangkal dan dekat mulut/hilir sungai biasanya rendah. Pada daerah estuari, konsentrasi garam berbeda dari dasar sampai permukaan, dari hulu sampai hilir, dan dari musim ke musim, menciptakan bahkan merubah kondisi bentuk kehidupan yang menempati badan air tersebut.

Sebagian besar mikroorganisme laut merupakan halofilik, yang tumbuh dengan baik pada konsentrasi NaCl kurang dari 2,5 - 4,0%. Dengan kata lain, mikroorganisme dari danau dan sungai dapat dihambat pertumbuhannya dengan konsentrasi NaCl lebih dari 1%.

e. Turbiditas

Turbiditas atau kekeruhan menandakan perbedaan dalam kejernihan air. Laut Adriatik bersih dan berkilauan pada bagian kedalaman sedangkan sungai Mississippi sangat keruh. Bahan yang tercampur yang mampu mengeruhkan air adalah :

1. Partikel bahan mineral;
2. *Detritus*, partikel bahan organik seperti potongan selulosa, hemiselulosa, dan kitin dari hasil dekomposisi hewan dan tumbuhan;
3. Suspensi mikroorganisme

Air yang sangat keruh, menyebabkan kurang tembus cahaya, zona fotik kurang dalam. Partikel bahan-bahan juga tersedia sebagai tempat menempelnya mikroorganisme. Beberapa spesies bakteri menempel pada permukaan yang padat dengan maksud berkolonisasi, misalnya Epibakteria. Partikel tersebut juga tersedia sebagai substrat untuk metabolisme mikroorganisme.

f. Konsentrasi Ion Hidrogen (pH)

Mikroorganisme akuatik biasanya tumbuh baik pada pH 6,5-8,5. Air laut memiliki pH 7,5-8,5, dan sebagian besar mikroorganisme laut tumbuh baik pada media kultur dengan pH 7,2-7,6. Danau dan sungai dapat memiliki kisaran pH yang luas bergantung pada kondisi lingkungan setempat. Sebagai contoh, archaebakteria dapat diisolasi dari danau garam di Afrika, dimana pH tinggi sekitar 11,5, spesies archaebakteria lain dapat hidup pada pH sangat rendah 1,0 atau kurang.

g. Nutrien

Jumlah dan macam bahan organik dan anorganik (nutrien) yang terdapat dalam lingkungan akuatik secara nyata membantu pertumbuhan mikroorganisme. Nitrat dan fosfat merupakan unsur anorganik yang mendukung pertumbuhan alga. Kelebihan nitrat dan/atau fosfat dapat menyebabkan kelebihan pertumbuhan alga (*'blooming'*) pada badan air dan memperbesar penggunaan oksigen dalam air, juga menutupi permukaan air, sehingga air sulit ditembus cahaya, dan akhirnya mematikan semua kehidupan dalam air.

Jumlah nutrien dalam badan air mengarah pada penimbunan nutrien dalam suatu lingkungan. Air dekat-pantai, yang menerima air limbah domestik yang mengandung senyawa organik dan anorganik, merupakan daerah yang mengalami

peningkatan dan penurunan secara singkat timbunan nutrien, sedangkan laut lepas memiliki timbunan nutrien yang lebih rendah dan stabil. Limbah industri dan limbah pertanian dapat mengandung zat antimikroba, merkuri dan logam berat lain juga dapat memasuki daerah estuari dan air pantai.

Sejumlah alga akuatik menghasilkan toksin yang mematikan ikan dan hewan lain. Toksin tersebut dikeluarkan dari sel atau melalui dekomposisi alga oleh bakteri dalam kondisi “blooming”. Alga laut tertentu (*Gymnodinium* dan *Gonyaulax*) dapat menghasilkan neurotoksin yang mematikan hewan akuatik. Toksin tertentu dapat terkonsentrasi dalam kelenjar pencernaan moluska (kerang-kerangan) dan menyebabkan paralisis pada manusia yang mengkonsumsi kerang beracun tersebut.

3. MIKROORGANISME DALAM AIR JERNIH

Dalam air yang dianggap jernih, misalnya berasal dari sumur biasa, sumur pompa, sumber mata air dan sumber air lainnya, bisa terdapat mikroorganisme misalnya :

- a) Kelompok bakteri besi (contoh, *Crenothrix* dan *Sphaerotilus*) yang mampu mengoksidasi senyawa besi (II) menjadi besi (III). Akibat kehadiran mikroorganisme tersebut, air sering mengalami perubahan warna kalau disimpan lama yaitu berwarna kehitam-hitaman, kecoklat-coklatan, dan lain-lain.
- b) Kelompok bakteri belerang (contoh, *Chromatium* dan *Thiobacillus*) yang mampu mereduksi senyawa sulfat menjadi H_2S . Akibatnya kalau air disimpan lama akan tercium bau busuk.
- c) Kelompok mikroalga (misalnya yang termasuk kelompok mikroalga hijau-biru, biru, dan kersik), sehingga jika air disimpan lama di dalamnya akan nampak kelompok mikroorganisme yang berwarna hijau, biru atau kekuning-kuningan, tergantung dominasi mikroalga yang terdapat dalam air serta lingkungan yang mempengaruhinya.

Lebih jauh lagi akibat kehadiran kelompok bakteri dan mikroalga dalam air, dapat mendatangkan kerugian. Misalnya karena terjadi peningkatan kekeruhan dan hambatan aliran, hal tersebut disebabkan kelompok bakteri besi dan belerang dapat membentuk serat atau lendir.

Akibat lainnya adalah terjadinya proses korosi (pengkaratan) terhadap benda-benda logam yang berada di dalamnya maupun pipa saluran air, menyebabkan bau, berubah warna, dan lain-lain.

4. KUALITAS AIR

a. Parameter Alami

Di bidang mikrobiologi air, kehadiran mikroorganisme tertentu khususnya bakteri dan mikroalga, dapat digunakan sebagai mikroorganisme parameter/indikator-alami terhadap kehadiran pencemar organik.

Misalnya bakteri *Sphaerotilus*, kehadirannya dapat menjadi petunjuk terhadap kandungan senyawa organik tinggi di dalam badan air. Juga mikroalga *Anabaena* dan *Mycrocystis* dapat menjadi petunjuk kehadiran senyawa fosfat tinggi di dalam badan air. Sedangkan mikroalga-kersik (Diatome) lebih cenderung menjadi petunjuk terhadap kehadiran senyawa kimia yang bersifat toksik di dalam badan air.

Kehadiran materi fekal (dari tinja) di dalam badan air dapat diketahui dengan adanya kelompok bakteri Coli. Di dalam penentuan kualitas air secara mikrobiologik, kehadiran bakteri tersebut ditentukan berdasarkan uji tertentu dengan perhitungan tabel JPT (Jumlah Perkiraan Terdekat).

Kehadiran materi fekal di dalam air minum sangat tidak diharapkan, baik ditinjau dari segi estetika, sanitasi, maupun dengan alasan infeksi. Jika di dalam 100 ml sampel air didapatkan 500 sel bakteri Coli, memungkinkan terjadinya infeksi gastroenteritis yang segera diikuti oleh demam tifoid. *Escherichia coli* sebagai salah satu contoh jenis Coli, pada keadaan tertentu dapat mengalahkan mekanisme pertahanan tubuh, sehingga dapat menyebabkan infeksi pada kandung kemih, pelviks, ginjal dan hati. Juga dapat menyebabkan diare, peritonitis, meningitis dan lain-lain.

Dari jumlah feses yang dihasilkan setiap hari oleh manusia (100-150 gram), di dalamnya dapat terkandung sekitar 3×10^{11} (300 milyar) sel bakteri Coli. Sehingga kehadiran bakteri Coli di dalam badan air diparalelkan dengan terjadinya kontaminasi materi fekal. Dengan kata lain, lebih tinggi kandungan bakteri Coli maka lebih kotor dan tidak memenuhi syarat keadaan air tersebut untuk kepentingan manusia, khususnya untuk air minum.

b. Kualitas Biologi

Menurut ketentuan WHO dan APHA, kualitas air ditentukan oleh kehadiran dan jumlah bakteri Coli di dalamnya, yaitu untuk air minum dan untuk air keperluan lain (Tabel 11-2), sedangkan secara umum berdasarkan sifat kimia, fisik dan mikrobiologi, maka kualitas air akan ditentukan berdasarkan keperluannya.

Tabel 11.2 Kandungan bakteri Coli di dalam air berdasarkan WHO (1968)

Keperluan Air	Jumlah maksimum yang diperkenankan (per 100 ml sampel air)
Rekreasi	1000
Kolam Renang	200
Minum	1

Penentuan kualitas air secara umum, misalnya untuk air sungai, air danau ataupun air kolam, dapat pula diukur berdasarkan Nilai Indeks Pencemar-biologi (IPB) dapat dilihat pada Tabel 11-3.

Tabel 11.3 Nilai air berdasarkan nilai IPB.

Nilai IPB	Nilai/Keadaan Air
0 – 8	Bersih, jernih
9 – 20	Tercemar – ringan
21 – 60	Tercemar – sedang
61 - 100	Tercemar – berat

Penentuan kehadiran mikroorganisme dalam air, berdasarkan kebutuhan untuk mengetahui ada tidaknya jenis yang berbahaya sebagai penyebab penyakit, penghasil toksin dan penyebab pencemaran air.

Organisme hidup yang mungkin ditemukan dalam sumber-sumber air antara lain dari golongan bakteri, mikroalga, cacing, serta plankton. Kehadiran organisme tersebut tidak diharapkan dalam air. Hal ini disebabkan mikroorganisme dapat menyebabkan penyakit, di samping adanya pengaruh lain seperti timbul rasa dan bau tidak sedap atau perubahan rupa air. Masalah utamanya dalam hal ini adalah aman tidaknya suatu sumber air terhadap kesehatan.

Penentuan kualitas mikrobiologi sumber air dilatarbelakangi dasar pemikiran bahwa air tersebut tidak akan membahayakan kesehatan konsumen. Dalam konteks ini maka penentuan kualitas mikrobiologik air didasarkan pada analisis kehadiran mikroorganisme indikator yang selalu ditemukan dalam tinja manusia atau hewan berdarah panas. Mikroorganisme ini tinggal dalam usus manusia maupun hewan berdarah panas dan merupakan bakteri yang dikenal dengan nama bakteri Coliform.

Bila dalam sumber air ditemukan bakteri Coliform maka hal ini merupakan petunjuk bahwa air tersebut telah mengalami pencemaran oleh feses manusia atau hewan berdarah panas.

c. Kualitas Fisik

Kualitas fisik yang umum dianalisa dalam penentuan kualitas air meliputi kekeruhan, suhu, warna, bau, dan rasa. Kekeruhan air dapat ditimbulkan oleh adanya bahan-bahan anorganik dan organik yang terkandung dalam air, seperti lumpur dan bahan-bahan yang dihasilkan oleh industri.

Dari segi estetika, kekeruhan dalam air dihubungkan dengan kemungkinan pencemaran oleh air buangan. Air yang mengandung kekeruhan tinggi akan sukar disaring dan mengakibatkan biaya pengolahan menjadi lebih tinggi. Selain itu kekeruhan air menyebabkan hambatan bagi proses disinfeksi. Oleh karena itu kekeruhan air harus dihilangkan dan air yang akan dipergunakan untuk air minum.

Bahan-bahan yang mengakibatkan kekeruhan air, berdasarkan sifat pengendapannya, dapat dibedakan dalam dua jenis, yaitu :

- a. Bahan yang mudah mengendap (*settleable*) ; dan
- b. Bahan yang sukar mengendap (koloidal).

Bahan jenis pertama dapat dihilangkan dengan proses-proses pengendapan (sedimentasi) dan penyaringan (filtrasi). Sedangkan yang kedua hanya dapat dihilangkan dengan proses flokulasi dan koagulasi yang diikuti dengan proses sedimentasi dan filtrasi, dimana diperlukan penambahan bahan kimia (koagulan) ke dalam air. Bau dan rasa dapat dihasilkan oleh kehadiran organisme dalam air seperti alge serta oleh adanya gas seperti H_2S yang terbentuk dalam kondisi anaerobik, juga oleh adanya bahan organik tertentu.

Dari segi estetika, air yang berbau dan mempunyai rasa, sangat tidak menyenangkan untuk diminum. Bau dan rasa dalam air juga dapat menunjukkan kemungkinan adanya mikroorganisme penghasil bau dan rasa yang tidak enak serta adanya senyawa-senyawa asing yang mengganggu kesehatan. Selain itu dapat pula menunjukkan kondisi anaerobik sebagai hasil aktivitas penguraian senyawa organik oleh kelompok mikroorganisme tertentu. Warna air dapat ditimbulkan oleh kehadiran

mikroorganisme, bahan-bahan tersuspensi yang berwarna, dan ekstrak senyawa-senyawa organik serta tumbuh-tumbuhan.

Dari segi estetika, konsumen pada umumnya tidak mau minum air yang berwarna. Warna yang berasal dari bahan buangan industri kemungkinan dapat membahayakan kesehatan. Warna dalam air juga dapat mengandung senyawa-senyawa organik yang jika dilakukan proses klorinasi terhadap air tersebut akan mengakibatkan terbentuknya kloroform. Senyawa-senyawa organik tersebut juga dapat mengakibatkan peningkatan pertumbuhan mikroorganisme akuatik.

Kenaikan temperatur air menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut. Kadar oksigen terlarut yang terlalu rendah, akan menimbulkan bau tidak sedap akibat terjadinya degradasi anaerobik oleh mikroorganisme. Kadar residu terlarut yang tinggi dapat menyebabkan rasa tidak enak dan dapat mengganggu sistem pencernaan makanan. Air dengan kadar residu terlarut yang tinggi, cenderung memiliki kesadahan yang tinggi pula. Standar kualitas fisik untuk keperluan air minum menurut Peraturan Menteri Kesehatan R.I. no. 01/BIRHUKMAS/I/75 tahun 1975 tercantum dalam Tabel 11-4.

Tabel 11.4 Standar kualitas fisik air kadar air minum.

Parameter	Satuan	Minimum yang dianjurkan	Maksimum yang dianjurkan
Kekeruhan	mg/L SiO ₂	5	25
Rasa	-	Tidak berasa	Tidak berasa
Warna	Unit Pt-Co	5	50
Temperatur	°C	suhu air normal	suhu air normal
Residu terlarut	mg/L	500	1500

d. Kualitas Kimiawi

Adanya masalah-masalah seperti senyawa-senyawa kimia yang beracun, perubahan rupa, warna, dan rasa air, serta reaksi-reaksi yang tidak diharapkan menyebabkan diadakannya standar kualitas air minum. Standar kualitas air memberikan batas konsentrasi maksimum yang dianjurkan dan yang diperkenankan bagi berbagai parameter kimia, karena pada konsentrasi yang berlebihan kehadiran unsur-unsur tersebut dalam air akan memberikan pengaruh negatif, baik bagi kesehatan maupun dari segi pemakaian lainnya.

Pembatasan pH dilakukan karena pH akan mempengaruhi rasa, korosivitas air dan efisiensi klorinasi. Beberapa senyawa asam dan basa lebih toksik dalam bentuk molekuler, dimana disosiasi senyawa-senyawa tersebut dipengaruhi oleh pH. Misalnya logam-logam berat, di dalam suasana asam bersifat lebih toksik.

Kesadahan air yang tinggi akan mempengaruhi efektivitas pemakaian sabun, namun sebaliknya dapat memberikan rasa yang segar. Di dalam pemakaian untuk industri (air ketel, air pendingin atau pemanas) adanya kesadahan dalam air tidak dikehendaki.

Kehadiran unsur Arsen (As) pada kadar yang rendah, sudah bersifat racun untuk manusia, sehingga perlu dibatasi secara ketat (maksimum sekitar 0,05 mg/L). Demikian pula dengan unsur Sianida (Cn). Kehadiran besi (Fe) dalam air bersih menyebabkan timbulnya rasa dan bau logam, menimbulkan warna koloid merah (karat) dalam air akibat oksidasi oleh oksigen terlarut dan dapat bersifat racun bagi manusia. Batas dan pengaruh berbagai parameter kimia terhadap kualitas air tercantum dalam Tabel 11-5 .

Tabel 11.5 Kandungan kimia yang diperkenankan di dalam air.

Parameter	Satuan	Indonesia		W.H.O.	
		Maks. yang dianjurkan	Maks. yang diperbolehkan	Maks. yang dianjurkan	Maks. yang diperbolehkan
PH		6.5 – 8,5	6.5 – 8,5	7.0 – 8,5	6.5 – 9,2
Ca (Kalsium)	mg/L	75	200	75	200
Mg (Magnesium)	mg/L	30	150	50	150
Ba (Barium)	mg/L	0	0,05	-	-
Besi (Fe)	mg/L	0,1	1,0	0,3	1,0
Mn (mangan)	mg/L	0,05	0,5	0,1	0,5
Cu (Tembaga)	mg/L	0	1,0	1,0	1,5
Zn (Seng)	mg/L	1,0	15	5,0	15
Cr(Krom heksavalen)	mg/L	0	0,05	-	0,05
Cd (Kadmium)	mg/L	0	0,01	-	-
Hg (Raksa total)	mg/L	0,0005	0,001	-	-
Pb (Timbal)	mg/L	0,05	0,01	-	0,1
As (Arsen)	mg/L	0	0,05	-	0,2
Se (Selenium)	mg/L	0	0,01	-	0,05
Cn (Sianida)	mg/L	0	0,05	-	0,01
F (Fluorida)	mg/L	-	1,5	0,5	1,0 – 1,5
Cl (Klorida)	mg/L	200	600	200	600
SO ₄ (Sulfat)	mg/L	200	400	200	400
NH ₃ -N (Amoniak)	mg/L	0	0	-	-
NO ₃ -N (Nitrat)	mg/L	5	10	-	5 – 10
NO ₂ -N (Nitrit)	mg/L	0	0	-	0
KmnO ₄ (Kalium permanganat)	mg/L	-	10	-	-
	KMnO ₄				

Fenol	mg/L	0,001	0,002	-	-
Kesadahan	CaCO ₃	-	84 – 168	-	110 – 500
Senyawa aktif biru metilen	mg/L	0	0,5	-	-
Minyak dan lemak	mg/L	0	0	-	-
Karbon kloroform ekstrak	mg/L	0,04	0,5	-	-
PCB	mg/L	0	0	-	-

Tabel 11.6 Standar yang diusulkan untuk badan air sumber air minum.

Kualitas parameter	Nilai yang diharapkan
Kerapatan Coli-fekal	Kualitas efluen sama seperti untuk air-alami
PH	6,5 – 8,5
Oksigen terlarut (DO)	2 mg/L
As (Arsen)	0,05 mg/L
Pb (Timbal)	0,05 mg/L
Cr (Kromium)	0,05 mg/L
Cn (Sianida)	0,2 0 mg/L
Senyawa fenol	0,002 mg/L
Cl (Klorida)	1000 mg/L
Jumlah padatan terlarut (TDS)	4000 mg/L

5. MIKROORGAISME INDIKATOR

Penentuan secara langsung untuk mengetahui adanya virus dan bakteri patogenik, juga kista protozoa parasit, membutuhkan waktu, biaya, dan tenaga kerja yang terampil. Kebutuhan ini mengarah pada konsep organisme indikator polusi fekal. Mulai tahun 1914, *the U.S. Public Health Service* menggunakan kelompok coliform sebagai suatu indikator pada air minum yang terkontaminasi fekal. Selanjutnya, berbagai mikroorganisme digunakan untuk menunjukkan terjadinya kontaminasi fekal, efisiensi dalam pengolahan air dan sistem pengolahan air buangan, dan deteriorasi dan *post*-kontaminasi air dalam sistem distribusi.

Kriteria untuk suatu mikroorganisme indikator yang ideal, adalah sebagai berikut :

1. Harus merupakan anggota mikroflora intestinal hewan berdarah-panas.
2. Harus terdapat pada saat patogen ada dan tidak ada pada sampel yang tidak-terkontaminasi.
3. Harus terdapat dalam jumlah yang lebih besar dari patogen.
4. Resistensinya terhadap pengaruh lingkungan dan disinfeksi dalam sistem pengolahan air dan air buangan, paling sedikit harus sebanding dengan patogen.

5. Tidak boleh berkembang biak dalam lingkungan.
6. Dapat ditentukan dengan metode yang mudah, cepat dan murah.
7. Mikroorganisme indikator harus bersifat non-patogenik.

Mikroorganisme indikator yang biasa digunakan atau dianjurkan menurut (APHA, 1989; Berg, 1978; Ericksen and Dufour, 1986; Olivieri, 1983) :

(1). Coliform Total (*Total Coliforms*)

Kelompok Coliform total termasuk bakteri bentuk batang, Gram-negatif, tidak membentuk-spora, aerobik dan anaerobik fakultatif yang memfermentasi laktosa dengan menghasilkan gas dalam 48 jam pada suhu 35 °C (APHA, 1989).

Kelompok ini termasuk *Escherichia coli*, *Enterobacter*, dan *Citrobacter*. Coliform tersebut dikeluarkan dalam jumlah yang besar (2×10^9 coliform per hari per kapita) dalam feses manusia dan hewan, tetapi tidak semua bakteri tersebut berasal dari fekal. Indikator tersebut sering digunakan untuk menentukan kualitas air minum, kerang air, dan air untuk rekreasi. Mikroorganisme tersebut kurang sensitif terhadap disinfektan dan faktor lingkungan jika dibandingkan dengan virus atau kista protozoa. Beberapa anggota dari kelompok tersebut (contohnya, *Klebsiella*) kadang-kadang tumbuh di bawah kondisi lingkungan dalam limbah industri dan pertanian. Dalam efisiensi pelaksanaan sistem pengolahan air buangan, total coliform merupakan salah satu indikator terbaik. Kelompok ini juga sering digunakan untuk menaksir keamanan air-limbah yang dimanfaatkan kembali (direklamasi) *pada the Windhhoek reclamation plant* di Namibia (Grabow, 1990 dalam Bitton, 1994).

(2). Coliform Fekal

Coliform fekal termasuk semua coliform yang dapat memfermentasi laktosa pada suhu 44,5°C. Kelompok coliform fekal terdiri dari bakteri seperti, *E. coli* dan *Klebsiella pneumoniae*. Adanya coliform fekal menunjukkan adanya materi fekal dari hewan berdarah-panas. Bagaimanapun, tidak dapat dibedakan kontaminasi disebabkan oleh hewan atau oleh manusia. Beberapa saran menganjurkan penggunaan *E. coli* sebagai indikator polusi fekal, karena bakteri tersebut dapat dengan mudah dibedakan dari anggota kelompok coliform fekal (contohnya, tidak terdapat urease dan terdapat β -glukuronidase). Coliform fekal memperlihatkan pola ketangsgungan hidup yang sama dengan bakteri patogen, tetapi bakteri ini tidak dibutakan khususnya untuk indikator adanya kontaminasi virus dan kista protozoa.

Coliform fekal kurang resisten terhadap disinfeksi dibandingkan dengan virus atau kista protozoa. Standar coliform tidak layak digunakan untuk menunjukkan polusi virus pada kerang dan air yang berhubungan. Coliform fekal juga tumbuh kembali pada air dan air limbah dalam kondisi yang memungkinkan.

(3). *Streptococcus* Fekal

Kelompok ini terdiri dari *Streptococcus faecalis*, *S.bovis*, *S. equinus*, dan *S. avium*. Sejak kelompok bakteri ini menempati saluran intestinal manusia dan hewan berdarah-panas, maka kelompok ini digunakan untuk menentukan kontaminasi fekal dalam air. Anggota kelompok ini tetap ada dalam lingkungan tetapi tidak berkembang biak. Subkelompok dari kelompok streptococcus fekal, enterococcus (*Streptococcus faecalis* dan *S. faecium*), dianggap sering digunakan untuk menunjukkan adanya virus, khususnya dalam lumpur dan air-laut. Perbandingan coliform fekal terhadap *Streptococcus* fekal (rasio FC/FS) tersedia sebagai indikator asal polusi permukaan air.

Rasio 4 atau lebih menunjukkan suatu kontaminasi asal manusia, sedangkan rasio di bawah 0,7 menunjukkan polusi hewan. (Geldreich and Kenner, 1969 dalam Bitton, 1994). Rasio ini hanya bersifat valid dalam waktu (24 jam) polusi fekal. Bagaimanapun, beberapa peneliti mempertanyakan rasio yang jarang digunakan ini.

(4). Bakteri Anaerobik

Bakteri anaerobik yang tetap dipertimbangkan sebagai indikator adalah : *Clostridium perfringens*. Mikroorganisme ini merupakan bakteri bentuk-batang, pembentuk-spora, Gram-positif anaerobik yang menghasilkan spora jika terdapat tekanan lingkungan dan disinfeksi. Spora yang sangat kuat membuat bakteri ini sangat resisten untuk digunakan sebagai mikroorganisme indikator. Penggunaan bakteri ini disarankan sebagai indikator tapi setelah terjadi polusi dan sebagai pencari jejak asal patogen. Bakteri ini juga layak menjadi indikator untuk mengetahui asal polusi fekal pada lingkungan laut (contohnya, endapan laut karena pengaruh buangan lumpur pantai New Jersey) (Burkhardt and Watkins, 1992; Hill et al., 1993 dalam Bitton, 1994).

Bifidobacteria. *Bifidobacteria* merupakan bakteri Gram-positif, tidak-membentuk spora, anaerobik yang disarankan sebagai indikator fekal. Sejak beberapa dari bakteri ini dihubungkan terutama dengan manusia (*B. bifidum*, *B.*

adeolenscentis, *B. infantis*), kelompok bakteri tersebut dapat membantu membedakan kontaminasi yang disebabkan oleh manusia dengan yang disebabkan oleh hewan. Bagaimanapun, dibutuhkan perkembangan metode yang layak untuk mendeteksi bakteri tersebut.

Bacteroides spp. Bakteri anaerobik ini terdapat dalam saluran intestinal pada konsentrasi kira-kira 10^{10} sel per gram feses, dan ketahanan hidup *B. fragilis* dalam air lebih rendah dari *E. coli* dan *S. faecalis*. Uji antiserum fluoresen untuk bakteri ini merupakan metode yang sering digunakan untuk menunjukkan adanya kontaminasi fekal dalam air (Fiksdal et al., 19985; Holdeman et al., 1976 dalam Bitton, 1994).

(5). Bakteriofaga

Bakteriofaga sama dengan virus enterik tetapi lebih mudah dan lebih cepat dideteksi dalam sampel lingkungan dan ditemukan dalam jumlah yang lebih besar dibanding virus enterik dalam air limbah dan lingkungan lainnya. Beberapa peneliti mempertimbangkan penggunaan colifaga sebagai indikator kualitas air di daerah muara (estuaria) (O'Keefe and Green, 1989), air laut (terdapat hubungan yang erat antara colifaga dengan *Salmeonella*) (Borrego et al., 1987), air bersih untuk rekreasi (Dutka et al., 1987), dan air minum (Ratto et al., 1989). Dari seluruh indikator yang diuji, colifaga memperlihatkan hubungan yang erat dengan virus enterik dalam sungai berpolusi di Afrika Selatan. Insidensi antara virus enterik dan colifaga berbanding terbalik dengan temperatur (Geldenhuis ang Pretorius, 1989). Colifaga juga merupakan indikator untuk menaksir efisiensi pembersihan sistem pengolahan air limbah dan air. Dalam sistem lumpur yang diaktifkan, colifaga membentuk plak lebih besar dari 3 mm, berhubungan secara signifikan dengan jumlah enterovirus (Funderburg and Sorber, 1985 dalam Bitton, 1994).

Dalam sistem pengolahan air, colifaga menyediakan informasi yang berhubungan dengan pelaksanaan proses pengolahan air seperti koagulasi, flokulasi, penyaring pasir, adsorpsi terhadap karbon aktif, dan disinfeksi (Payment, 1991). Beberapa colifaga, khususnya faga f2 RNA, lebih resisten terhadap klorinasi dibandingkan dengan enterovirus seperti poliovirus tipe 1. Bagaimanapun, MS2 (faga RNA lain) tidak layak mewakili virus enterik dalam menentukan efisiensi disinfeksi yang menggunakan ozon (finch and fairbairn, 1991). Jadi bakteriofaga

tidak selalu menjadi indikator untuk virus enterik dalam segala situasi (Gerba, 1987 dalam Bitton, 1994).

Bakteriofaga F-spesifik (faga spesifik-jantan) memasuki suatu sel bakteri inang melalui absorpsi kepada pili F atau pili seks sel bakteri. Sejak faga F-spesifik jarang dideteksi dalam materi fekal manusia dan memperlihatkan hubungan tidak langsung dengan tingkat polusi fekal, maka faga tersebut tidak dipertimbangkan sebagai indikator polusi fekal (Havelaar et al., 1990; Morinigo et al., 1992). Bagaimanapun kekeradaannya dalam jumlah yang besar dalam air limbah dan resistensinya terhadap klorinasi relatif tinggi, faga tersebut dianggap memberikan kontribusi terhadap indeks kontaminasi air limbah (Debartolomeis and Cabelli, 1991; Havelaar et al., 1990; Nasser et al., 1993; Yahya and Yanko, 1992). Hasil monitoring efluen *post*-klorinasi setelah turun hujan memperlihatkan bahwa coliform fekal dan enterococcus lebih sensitif terhadap klorin dibandingkan dengan bakteriofaga spesifik-jantan. Dalam hal kontaminasi kerang, bakteriofaga spesifik-jantan dapat bertahan hidup paling sedikit 7 hari dalam kerang bercangkang-keras pada ambang batas temperatur airlaut dan tidak mengalami replikasi dengan atau tanpa penambahan sel inang.

Penelitian juga dilakukan terhadap kemampuan bakteriofaga pada *Bacteroides spp.* sebagai indikator untuk polusi virus. Faga aktif menyerang *B. fragilis* HSP 40 dideteksi dalam feses (ditemukan dalam 10% sampel fekal manusia tapi tidak dalam feses hewan), air limbah dan lingkungan akuatik berpolusi lainnya.(air sungai, air laut, air tanah, endapan) tetapi tidak terdapat pada daerah yang tidak mengalami polusi). Indikator tersebut kelihatan tidak berkembang biak dalam sampel dari lingkungan dan bersifat lebih resisten terhadap klorin dibandingkan dengan bakteri indikator (*E. coli*, *E. faecalis*) atau virus (poliovirus tipe 1, rotavirus SA11 dan colifaga f2). Bagaimanapun, faga tersebut kurang resisten dibandingkan dengan colifaga f2 terhadap iradiasi UV. Jadi faga ini layak sebagai indikator polusi fekal manusia dan digunakan untuk membedakan antara polusi fekal manusia dengan polusi fekal hewan. Faga ini juga berkorelasi positif dengan enterovirus dan rotavirus dan faga tersebut menetap dalam air laut seperti hepatitis A. Kelayakan faga tersebut sebagai indikator polusi virus belum banyak diperlihatkan.

Tabel 11.7 Tingkat aktivitas Bakteriofaga menyerang *B. fragilis* HSV 40 dalam air dan endapan.

Sampel	Jumlah sampel	Sampel positif untuk faga (%)	Nilai maksimum /100 ml	Nilai minimum /100ml	Nilai rata-rata /100 ml
Air limbah/kotor	33	100	$1,1 \times 10^5$	7	$6,2 \times 10^5$
Air sungai	22	100	$1,1 \times 10^5$	93	$1,6 \times 10^5$
Endapan sungai	5	100	$4,6 \times 10^5$	90	$1,08 \times 10^5$
Air laut	22	77,2	$1,1 \times 10^5$	<3	$1,2 \times 10^5$
Endapan laut	12	91,0	43	<3	13,4
Air-tanah	19	21,0	NK ^d	0	
Air dan endapan non-polutan	50	0	0		

Keterangan : Sampel air sungai, endapan sungai, air laut, endapan laut, air-tanah diperoleh dari daerah berpolusi air kotor ; NK^d = tidak diketahui.

(6). Organisme *Acid-fast* dan *Yeasts*

Beberapa peneliti mengusulkan ragi (*Yeasts*) dan mycobacteria tahan-asam (*M. fortuitum* dan *M. phlei*) sebagai indikator efisiensi disinfeksi . Bakteri tahan asam (*Acid-fast*) *M. fortuitum* lebih resisten terhadap klorin bebas dan ozon dibandingkan dengan *E. coli* atau poliovirus tipe 1.

6. ANALISIS MIKROBIOLOGI AIR

Analisis terhadap suatu habitat yang ditujukan untuk kepentingan pengelolaan lingkungan, harus memperhitungkan interaksi antara faktor biotik dengan faktor abiotik. Sehingga langsung ataupun tidak langsung analisis tersebut harus menggunakan pendekatan ekologi.

Cara analisis berdasarkan pendekatan ekologi perlu dilaksanakan mengingat kepentingan dari hasil untuk pengelolaan lingkungan, baik yang berhubungan dengan sanitasi, kesehatan, dan estetika, ataupun untuk kepentingan bidang industri (air pendingin, air proses, pengelolaan buangan), dan sebagainya.

Pelaksanaan analisis dilakukan berdasarkan modifikasi dari metode yang didapat di dalam *Standard Methods* (APHA, 1973), *Modern Methods in the Study of Microbial Ecology* (Rosswall, 1973), *Isolation Methods for Microbiologists* (Shapton & Gilbert, 1968), yaitu : analisis dilakukan terhadap bahan yang telah tercampur

baik, dengan mengambil sampel sebanyak 3 kali masing-masing 100 ml yang ditempatkan ke dalam labu Erlenmeyer steril dan bersih

Agar hasil yang didapatkan semaksimal mungkin mendekati keadaan alami, pengenceran dilakukan sampai ke nilai tertinggi, umumnya sampai 10^{-11} . Karena dengan pengenceran tertinggi, perhitungan jumlah sel berdasarkan koloni yang tumbuh ataupun dengan pewarnaan hasilnya akan jauh lebih baik jika dibandingkan dengan cara pengenceran tertendah (di bawah 10^{-3}).

Bergantung pada tujuan analisis, terhadap bahan dapat dilakukan pemeriksaan secara langsung (pewarnaan : Gram, negatif, tahan-asam, dll) atau secara tidak langsung melalui penanaman pada media (umum ataupun diperkaya). Semua analisis dikerjakan sebanyak lima kali ulangan, kemudian hasil akhirnya berdasarkan nilai rata-rata.

Analisis Utama. Yang dimaksud dengan analisis utama, yaitu analisis yang keseluruhannya berdasarkan pemeriksaan mikrobiologi, antara lain :

a. Total Count.

Total Count adalah jika perhitungan jumlah tidak berdasarkan jenis, tetapi secara kasar dilakukan perhitungan terhadap kelompok besar mikroorganisme umum seperti bakteri, jamur, mikroalga maupun terhadap bakteri tertentu.

Total Count bakteri, ditentukan berdasarkan penanaman bahan dalam jumlah dan pengenceran tertentu ke dalam media yang umum untuk bakteri. Setelah diinkubasikan pada suhu kamar selama waktu maksimal 4 x 24 jam, dilakukan perhitungan koloni. Tiap koloni dianggap berasal dari satu sel, maka jumlah koloni dapat diperhitungkan sebagai jumlah sel yang mewakili dan terdapat dalam bahan yang dianalisis.

Total Count Fungi, dilakukan dengan metode yang sama, kecuali suhu inkubasi $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Kepada permukaan media pertumbuhan untuk fungi ditambahkan asam laktat 3%, sebelum memasukkan sampel dengan maksud mencegah pertumbuhan bakteri.

Total Count Mikroalga, media yang digunakan harus bersifat semisolid atau cair, yaitu dengan menambahkan tepung agar 50% dari yang diperlukan untuk bakteri atau fungi, jika banyaknya tepung agar sama dengan untuk pertumbuhan bakteri atau fungi, maka pertumbuhan mikroalga akan lambat atau terhambat sama sekali. Masa

inkubasi untuk mikroalga selama 5 – 15 hari, dan biakan harus ditempatkan pada tempat yang terang (mendapat sinar matahari).

Jenis medium yang digunakan untuk perhitungan total count kelompok mikroorganisme lain (bakteri besi, belerang, serta bakteri patogen penyebab infeksi, bakteri atau fungi penghasil racun), biasanya bersifat selektif atau diperkaya. Umumnya kelompok bakteri tertentu memerlukan masa adaptasi/aklimatisasi terlebih dahulu, inkubasi dalam suhu kamar memerlukan waktu antara 4-6 x 24 jam, sehingga pertumbuhan koloni dapat terlihat jelas. Inkubasi juga harus dilakukan sesuai dengan sifat bakteri (lingkungan aerobik atau anaerobik).

b. Penentuan Nilai IPB (Indeks Pencemar Biologis)

Penentuan Nilai IPB (Indeks Pencemar Biologis) atau Biological Indices of Pollution (BIP) suatu perairan, pada umumnya dilakukan kalau air dari suatu sumber perairan akan digunakan sebagai bahan baku untuk kepentingan pabrik/industri (sebagai air proses, air pendingin), untuk kepentingan rekreasi (berenang). Makin tinggi nilai IPB maka makin tinggi kemungkinan deteriosasi/korosi materi di dalam sistem pabrik (logam-logam yang mengandung Fe dan S), atau pun terhadap kemungkinan adanya kontaminasi badan air oleh organisme patogen.

Nilai IPB ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$IPB = \frac{B}{A + B} \times 100,$$

Dimana A : menunjukkan kandungan mikroorganisme yang mengandung klorofil,

B : menunjukkan kandungan mikroorganisme tidak mengandung klorofil.

Hasil tersebut akan memberikan besaran yang menyatakan nilai IPB. Perhitungan nilai dilakukan secara langsung (tanpa pembiakan) yaitu : Sampel air sebanyak 500-1000 ml, selanjutnya dipekatkan sampai menjadi 50 ml baik melalui penyaringan ataupun sentrifugasi (rata-rata 1500 rpm). Endapan yang terbentuk selanjutnya dianalisis untuk kehadiran mikroorganisme dengan menggunakan kolum hitung untuk mikroalga, dan pewarnaan untuk bakteri dan fungi. Kandungan kedua kelompok mikroorganisme tersebut dapat dijadikan dasar untuk perhitungan nilai IPB.

a. Perhitungan Nilai Total Coliform

Kelompok coliform total termasuk seluruh bakteri bentuk batang, tidak membentuk-spora, Gram-negatif, aerobik dan anaerobik fakultatif yang memfermentasi laktosa pada temperatur 35°C selama 48 jam. Coliform total ditentukan dengan teknik MPN (*Most Probable Number*) atau JPT (Jumlah Perkiraan Terdekat), atau dengan metode penyaring membran.

Penentuan JPT. Penentuan JPT dilakukan dengan menggunakan tabung reaksi berjumlah 3-3-3 atau 5-5-5 tanpa memperhatikan apakah di dalam kelompok tersebut termasuk Coli fekal (FCB/ *Fecal Coliform Bacterial*) ataupun non-FCB. Medium yang digunakan adalah kaldu laktosa, sebanyak 9 (3-3-3) atau 15 (5-5-5) tabung, masing-masing berisi 9 ml kaldu laktosa dilengkapi dengan tabung Durham dalam posisi terbalik. Untuk pengujian yang menggunakan 9 tabung, pada 3 seri tabung pertama diisi dengan 10 ml sampel air, 3 seri tabung kedua diisi dengan 1 ml sampel air, dan 3 seri tabung ketiga diisi dengan 0,1 ml sampel air. Perbedaan kedua kelompok tersebut dilakukan berdasarkan temperatur inkubasi, yaitu untuk FCB (42 ± 1 °C) dan untuk non-FCB (37 ± 1 °C). Setelah masa inkubasi 1-4 x 24 jam diamati timbulnya gas (gelembung udara pada tabung Durham) dan asam (media menjadi keruh). Coliform fekal juga dapat tumbuh pada kaldu EC pada temperatur 44,5 °C , dan pada agar m-FC menghasilkan koloni biru pada temperatur 44,5 °C.

Pelaksanaan analisis dilakukan berdasarkan metode standar dari APHA (*American Public Health Association*, 1989), yaitu untuk mengetahui jumlah bakteri Coli umumnya digunakan tabel Hopkins, yang lebih dikenal dengan nama tabel JPT (Tabel 10-8). Tabel tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah bakteri Coli dalam 100 ml sampel air. Pembacaan hasil uji dilihat dari berapa tabung uji yang menghasilkan gas dan asam (3 seri pertama, kedua dan ketiga), hasil yang positif asam dan gas dibandingkan dengan tabel JPT.

Beberapa kelemahan metode standar ini adalah :

- a) Di dalam satu percobaan hanya dapat menggunakan sedikit sampel air.
- b) Untuk mendapatkan kultur yang baik dibutuhkan waktu beberapa hari.
- c) Di dalam menghitung jumlah bakteri Coli hanya diperoleh jumlah perkiraan secara kasar.

- d) Membutuhkan banyak media dan perlengkapan.
- e) Tidak dapat dilakukan di lapangan tempat pengambilan sampel, sehingga membutuhkan sistem angkutan tertentu untuk mencegah atau menekan perubahan sampel yang mengandung bakteri Coli tersebut.

Tabel 11.8 Jumlah Perkiraan Terdekat Bakteri Coli, seri (3-3-3) dan (5-5-5).

(Sumber : Cappucino,1987)

Jumlah tabung dengan hasil positif			Nilai JPT per 100 ml	Jumlah tabung dengan hasil positif			Nilai JPT per 100 ml	Jumlah tabung dengan hasil positif			Nilai JPT per 100 ml
3 dari 10 ml	3 dari 1 ml	3 dari 0,1 ml		5 dari 10 ml	5 dari 1 ml	5 dari 0,1 ml		5 dari 10 ml	5 dari 10 ml	5 dari 10 ml	
0	0	1	3	0	0	0	<2	4	2	1	26
0	1	0	3	0	0	1	2	4	3	0	27
1	0	0	4	0	1	0	2	4	3	1	33
1	0	1	7	0	2	0	4	4	4	0	34
1	1	0	7	1	0	0	2	5	0	0	23
1	1	1	11	1	0	1	4	5	0	1	31
1	2	0	11	1	1	0	4	5	0	2	43
2	0	0	9	1	1	1	6	5	1	0	33
2	0	1	14	1	2	0	6	5	1	1	46
2	1	0	18	2	0	0	5	5	1	2	63
2	1	1	20	2	0	1	7	5	2	0	49
2	2	0	21	2	1	0	7	5	2	1	70
2	2	1	28	2	1	1	9	5	2	2	94
3	0	0	23	2	2	0	9	5	3	0	79
3	0	1	39	2	3	0	12	5	3	1	110
3	0	2	64	3	0	0	8	5	3	2	140
3	1	0	43	3	0	1	11	5	3	3	180
3	1	1	75	3	1	0	11	5	4	0	130
3	1	2	120	3	1	1	14	5	4	1	170
3	2	0	93	3	2	0	14	5	4	2	220
3	2	1	150	3	2	1	17	5	4	3	280
3	2	2	210	3	3	0	17	5	4	4	350
3	3	0	240	4	0	0	13	5	5	0	240
3	3	1	460	4	0	1	17	5	5	1	350
3	3	2	1100	4	1	0	17	5	5	2	540
				4	1	1	21	5	5	3	920
				4	1	2	26	5	5	4	1600
				4	2	0	22	5	5	5	>2400

Untuk mengetahui jenis bakteri yang diperoleh, harus dilakukan uji lanjutan dengan uji IMViC (Indol-Metil merah-Voges-Proskauer dan Sitrat), juga dengan uji media gula-gula (laktosa, glukosa, sukrosa). Hasil uji dapat dilihat pada Tabel 11-9.

Tabel 11.9 Perbedaan hasil uji pada bakteri golongan Coli.

Spesies /Golongan	Laktosa	Glukosa	Sukrosa	I	M	Vi	C	Gelatin	Gerak
<i>Escherichia coli</i>	a/g	a/g	a/g	+	+	-	-	-	+
<i>Citrobacter freundii</i>	a/g	a/g	a/g	-	+	-	+	-	+
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	a/g	a/g	a/g	-	-	+	+	-	-
<i>Enterobacter cloacae</i>	a/g	a/g	a/g	-	-	+	+	+	+
<i>Proteus vulgaris</i>	-	a/g	a/g	+	-	-	+	+	+
Grup <i>Providencia</i>	-	a/g	a/g	+	+	-	+	-	+
<i>Ps. Aeruginosa</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	+

Keterangan : a/g = asam dan gas, + = hasil positif, - = hasil negatif.

Metode penyaring membran. Pada tahun-tahun berikutnya digunakan cara baru untuk menghitung bakteri Coli yang dinamakan Teknik Penyaring Molekuler (*Molecular Filter Technique*) yang sekarang dikenal dengan nama Metode Penyaring Milipor/ metode penyaring membran (*Milipore Filter Method/membran filtration method*). Metode tersebut menggunakan selaput tipis berpori terbuat dari asetat-selulosa, koloidion atau materi yang serupa, ukuran pori 0,5 mikron atau lebih kecil. Penyaring milipor memiliki kelebihan sebagai berikut :

- a) Dapat digunakan untuk mencari jumlah bakteri di dalam sampel air, walaupun konsentrasi mikroba di dalamnya sangat kecil,
- b) Penyebaran bakteri dibatasi sesempit mungkin dan pada satu waktu dapat digunakan untuk campuran bakteri sampai 5.000 jenis,
- c) Setiap waktu dapat dilakukan pemisahan bakteri dari nutrisinya,
- d) Memberikan perhitungan yang langsung dari penentuan jumlah bakteri,
- e) Lebih cepat dan lebih baik dalam membedakan jenis bakteri
- f) Memberikan catatan hasil yang permanen dalam bentuk cawan-petri yang diawetkan.

Kelemahan metode ini adalah membran yang dipakai tidak dapat digunakan untuk menyaring air yang mengandung lumpur atau endapan, karena dapat menyumbat penyaring tersebut.

b. Penentuan Coliform Dengan Metode Cepat

b.1. Uji Enzimatik

Uji enzimatik (*Enzymatic assays*) merupakan suatu pendekatan untuk menentukan bakteri indikator, yang disebut coliform total dan *E. coli*, dalam air dan air-limbah. Uji tersebut bersifat spesifik, sensitif, dan cepat. Pada sebagian besar pengujian, penentuan coliform total terdiri dari pengamatan aktivitas β -galaktosidase, yang berdasarkan pada hidrolisis substrat o-nitrofenil- β -D-galaktopiranosida (ONPG) menjadi nitrofenol berwarna kuning, yang menyerap cahaya pada 420 nm. Suatu senyawa fluorogenik (4-metilumbelliferone- β -D-galaktopiranosida) juga dapat digunakan sebagai substrat β -galaktosidase. Penentuan coliform dengan uji β -galaktosidase dapat dilakukan dengan mencampurkan

isopropil- β -D-tiogalaktopiranosida (IPTG) suatu inducer produksi β -galaktosidase, ke dalam medium pertumbuhan.

Suatu uji komersial, *the Autoanalysis Colilert (AC) test*, juga disebut media minimal ONPG-MUG (MMO-MUG), saat ini dikembangkan untuk menghitung coliform total dan *E. coli* secara simultan selama 24 jam, dalam sampel dari lingkungan. Uji ini dilakukan dengan meempatkan sampel dalam tabung yang berisi garam dan substrat enzim spesifik, juga menyediakan sumber karbon hanya untuk mikroorganisme target. Substrat enzim adalah ONPG untuk menentukan coliform total dan MUG khususnya untuk menentukan *E. coli*. Sesuai petunjuk pabrik pembuat ONPG dan MUG tersedia sebagai substrat enzim juga sebagai sumber makanan untuk mikroorganisme. Setelah inkubasi 24 jam, sampel positif untuk coliform total berubah menjadi kuning, sedangkan sampel positif *E. coli* berfluoresensi pada panjang-gelombang UV dalam gelap. *Escherichia* lain tidak dapat dideteksi dengan uji Colilert. Hasil pengamatan sampel fekal manusia dan hewan menunjukkan bahwa 95% isolat *E. coli* positif- β -galaktosidase setelah inkubasi 24 jam.

a) Antibodi Monoklonal.

E. coli dapat dideteksi dengan menggunakan monoklonal antibodi langsung yang menyerang protein membran luar (contoh, protein PmpF) atau menyerang alkaline fosfatase (suatu enzim yang terletak pada daerah periplasma). Meskipun beberapa monoklonal antibodi bersifat spesifik untuk *E. coli* dan *Shigella*, beberapa peneliti mempertanyakan spesifitas dan afinitasnya, dibutuhkan penelitian selanjutnya untuk penggunaan metode ini dalam mendeteksi *E. coli* secara rutin dari sampel lapangan.

b) Metode Penentuan Pelacak-gen (*Polymerase-chain-reaction/PCR*).

Pada metode ini, gen spesifik (contoh, gen LacZ, lamB) dalam *E. coli* diperbanyak (amplifikasi) dengan PCR dan secara bertahap dideteksi dengan pelacak gen (*gene probe*). Dengan metode ini dapat ditentukan 1-5 sel *E. coli* dalam 100 ml air. Pelacak gen lain yang digunakan adalah “gen guid”, yang mengkode β -glukuronidase pada *E. coli* dan *Shigella*. Pelacak ini, ketika digabungkan dengan PCR, dapat mendeteksi sebanyak satu atau dua sel tetapi tidak dapat membedakan *E. coli* dengan *Shigella*. Metode PCR lebih sensitif dibandingkan metode CA dalam

mendeteksi *E. coli* dari sampel lingkungan. Hal ini disebabkan terdapatnya sekitar 15% strain negatif- β -glukuronidase dalam sampel dari lingkungan.

c. Heterotropic Plate Count (HPC).

HPC dalam air dan air limbah digambarkan sebagai jumlah total bakteri yang dapat tumbuh pada medium agar “plate count” dengan temperatur 35 °C selama 48 jam. Semua bakteri dalam sampel air ikut serta dalam penentuan coliform tersebut. HPC sangat dipengaruhi oleh temperatur dan lamanya inkubasi, medium pertumbuhan, dan metode ‘plating’ (‘pour plate’/lempeng tuang atau dengan ‘spread plate’/lempeng sebar). Suatu medium pertumbuhan, ditandai dengan R2A, sekarang dikembangkan untuk digunakan dalam HPC. Medium ini direkomendasikan untuk digunakan dengan masa inkubasi 5-7 hari pada temperatur 28 °C. HPC tidak melebihi 500 koloni per 1 ml. Jumlah di atas secara umum merupakan batas deteriorasi kualitas air dalam sistem distribusi.

Suatu pendekatan baru menggunakan faga lux+ rekombinan untuk menentukan bakteri indikator dalam 1-5 jam. Bakteri enterik menjadi bioluminesensi setelah diinfeksi dengan faga rekombinan dan dapat diukur dengan bioluminometer. Prosedur tersebut perlu dikembangkan.

d. Penentuan Bakteriofaga

Air limbah domestik mengandung sejumlah besar strain faga yang dapat dideteksi dengan berbagai bakteri inang. Tingkat faga tersebut dalam air limbah secara kasar dalam rentang $10^5 - 10^7$ partikel faga per liter, tetapi dapat menurun secara signifikan setelah pelaksanaan pengolahan air –limbah. Penentuan faga dalam efluen air dan air-limbah terdiri dari beberapa tahap, yaitu :

1. Pemekatan Faga. Faga dapat dipekatkan dari volume air yang besar melalui adsorpsi terhadap filter membran bermuatan positif atau negatif. Tahap ini diikuti dengan pengambilan faga yang teradsorpsi pada permukaan membran dengan glisin pada pH tinggi (pH = 11,5), ekstrak daging pada pH = 9,0, atau kasein pada pH = 9. Jika perlu dipekatkan kembali, tergantung konsentrasi yang diperlukan. Faga juga dapat dipekatkan dari sampel bervolume 2-4-L dengan flokulasi organik-magnetit. Setelah penambahan kasein dan magnetit,

sampel diflokulasikan pada pH = 4,5-4,6. Gumpalan, dengan virus yang terperangkap, dipisahkan dengan suatu magnet, dilarutkan kembali, dan duji.

2. Dekontaminasi konsentrat (bahan hasil pemekatan). Bakteri indigenus yang ada dalam bahan uji faga harus dinaktifkan atau dibuang dari konsentrat dengan ekstraksi kloroform, penyaring membran, penambahan antibiotik, atau menggunakan media selektif (contohnya, kaldu nutrisi yang dimodifikasi dengan natrium dodesil sulfat. Pemberian hidrogen peroksida pada konsentrat yang diikuti dengan 'plating' pada medium yang diperkaya dengan kristal violet yang sering digunakan untuk inaktivasi bakteri yang tercampur dalam bahan uji.
3. Uji Faga (*Phage assay*). Konsentrat diuji dengan menggunakan metode agar-lapis-dua atau prosedur agar-lapis-tunggal. Jumlah faga juga dapat diperoleh dengan prosedur JPT coli. Uni faga spesifik-jantan memerlukan penggunaan sel inang spesifik seperti strain WG49 *Salmonella typhimurium* atau strain HS[pFamp]R *E. coli*, tapi dapat mengalami kesulitan karena pertumbuhan faga somatik dalam sel inang. Faga somatik dapat ditekan dengan pemberian lipopolisakarida dari sel inang ke dalam sampel.

B. MIKROBIOLOGI TANAH

1. LINGKUNGAN TERESTRIAL

Dalam memperhatikan lingkungan terestrial/daratan, perhatian kita tidak dapat terhindar dari tanah dan tumbuhan, karena dalam tanah dan daerah dekat tumbuhan terjadi proses penting yang membantu berlangsungnya fungsi ekosistem tersebut. Proses perkembangan tanah melibatkan interaksi yang kompleks antara bahan baku (batu, pasir, dan lain-lain), topografi, iklim, dan organisme hidup. Tanah dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu : tanah mineral dan tanah organik, bergantung pada apakah tanah tersebut berasal dari hasil pelapukan batuan dan bahan anorganik lain, atau dari hasil pengendapan pada tanah berlumpur dan rawa.

Secara langsung maupun tidak langsung bahan buangan dari manusia, hewan serta jaringan tumbuh-tumbuhan umumnya dibuang atau dikubur dalam tanah. Setelah beberapa lama bahan-bahan tersebut berubah menjadi komponen organik dan

anorganik tanah. Perubahan ini juga dilakukan oleh organisme yaitu perubahan dari bahan organik menjadi substansi yang menyediakan nutrisi bagi tumbuhan.

Bentuk tanah merupakan hasil gabungan proses fisik, kimia, dan biologi. Suatu pengamatan terhadap hampir seluruh batuan terbuka, memperlihatkan adanya alga, lichenes, dan lumut. Organisme tersebut dapat tetap dorman pada batuan kering dan akan tumbuh jika batuan tersebut menjadi lembab. Organisme tersebut bersifat fototrofik dan menghasilkan bahan organik, yang membantu pertumbuhan bakteri dan fungi organotrof. Tanah, jika dianalisis akan merupakan campuran yang terdiri dari bahan organik, anorganik, air dan udara yang keseluruhannya tercampur menjadi satu secara sempurna, sehingga sukar untuk dipisahkan antara satu dengan yang lainnya. Senyawa organik merupakan kumpulan sisa-sisa makanan, yang sebagian telah diuraikan dan bahan ini merupakan bagian yang mudah dihancurkan oleh organisme tanah seperti bakteri, jamur, ragi, mikro-alga dan protozoa. Dengan demikian mikroorganisme merupakan bagian dari tanah yang memegang peranan penting dalam menentukan sifat dan tekstur tanah.

a. Tanah Sebagai Habitat Mikroorganisme

Hanya ada beberapa lingkungan di bumi ini yang mengandung banyak jenis mikroorganisme, misalnya seperti lingkungan dalam tanah yang subur. Bakteri, fungi, alga, protozoa dan virus bersama-sama membentuk kumpulan mikroorganisme yang dapat mencapai jumlah total sampai bermilyar-milyar organisme per gram tanah.

Untuk mengamati mikroorganisme pada partikel tanah secara langsung, organisme dalam tanah diwarnai dengan pewarna yang bersifat berpendar. Akibatnya setiap sel mikroorganisme memiliki sumber cahaya, sehingga bentuk dan letaknya pada permukaan partikel tanah menjadi mudah dilihat. Untuk mengamati mikroorganisme spesifik, sering digunakan pewarnaan antibodi-fluoresen. Dengan menggunakan mikroskop elektron morfologi mikroorganisme dapat dilihat dengan baik, juga dapat menghitung sel pada permukaan tanah.

Salah satu faktor terpenting yang mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dalam tanah adalah air, Air merupakan komponen variabel tanah, keberadaannya bergantung pada komposisi tanah, curah hujan, drainase/aliran udara, dan penutupan

tumbuhan. Air terperangkap dalam tanah dengan dua cara, yaitu : melalui adsorpsi pada permukaan tanah atau sebagai air bebas seperti lembaran tebal atau lapisan tipis di antara partikel tanah. Air dalam tanah memiliki berbagai bahan yang terlarut di dalamnya; keseluruhannya bercampur menjadi larutan tanah. Dalam tanah berdrainase-baik, tekanan air cepat dan konsentrasi oksigen menjadi cukup tinggi. Dalam tanah rawa, hanya terdapat oksigen yang terlarut dalam air, dan segera dikonsumsi oleh mikroorganisme tanah. Tanah demikian akan cepat bersifat anaerobik, memperlihatkan perubahan yang sangat cepat dalam komponen biologiknya.

Keadaan nutrisi dalam tanah, merupakan faktor penting lain yang mempengaruhi aktivitas mikroorganisme tanah. Aktivitas terbesar terdapat dalam lapisan permukaan yang kaya-bahan organik, khususnya pada daerah yang dekat dengan akar tumbuhan (rizosfer). Jumlah dan aktivitas mikroorganisme tanah bergantung pada besarnya tingkat keseimbangan jumlah nutrisi. Dalam tanah-berkarbon, tidak terdapat batas nutrisi, bahkan tersedia nutrisi organik misalnya fosfor dan nitrogen yang membatasi produktivitas mikroorganisme.

Keanekaragaman flora mikroorganisme tersebut merupakan masalah dalam hal menghitung populasi total mikroorganisme yang hidup dalam suatu sampel tanah. Metode biakan di laboratorium hanya akan menampakkan tipe fisiologik dan nutrisi, dalam lingkungan yang disediakan di laboratorium. Misalnya, bila suatu sampel tanah diinokulasikan pada agar nutrisi dan diinkubasikan pada temperatur maka beberapa tipe bakteri yang tidak akan tumbuh ialah termofil obligat, juga psikrofil, anaerob dan autotrof.

Tabel 11.10 Perbandingan jumlah kelompok mikroorganisme di rizosfer (daerah perakaran) dan tanah kontrol tanpa sistem perakaran

Mikroorganisme	Tanah rizosfer	Tanah kontrol
Bakteri	$1,2 \times 10^8$	$5,3 \times 10^6$
Aktinomisetes	$4,6 \times 10^7$	7×10^6
Cendawan	$1,2 \times 10^6$	1×10^5
Protozoa	$2,4 \times 10^3$	$1,0 \times 10^3$
Algae	5×10^3	$2,7 \times 10^4$
Kelompok Bakteri		
Pelaku aminofiksasi	$5,0 \times 10^7$	4×10^6
Anaerob penghasil gas	$3,9 \times 10^4$	3×10^4
Pelaku denitrifikasi	$1,26 \times 10^8$	1×10^6
Pelaku dekomposisi selulosa aerobik	7×10^6	1×10^5
Pelaku dekomposisi selulosa anaerobik	9×10^3	3×10^5
Pembentuk spora	$9,3 \times 10^5$	$5,75 \times 10^5$
Azotobakter	$< 1.000.$	$< 1.000.$

Sumber : Gray T.R. and Willians, *Soil Microorganism*, Hafner Publising Company.

Protozoa tidak akan tumbuh dan yang tumbuh hanya beberapa alga dan fungi. Hal ini berarti, bila suatu sampel tanah dibiakan di laboratorium, maka suatu prosedur pembiakan tertentu hanya akan memungkinkan tumbuhnya sebagian kecil dari populasi total mikroorganisme. Penghitungan mikroskopik langsung secara teoritis memungkinkan terhitungnya semua mikroorganisme kecuali virus, tetapi teknik ini juga mempunyai keterbatasan, terutama di dalam membedakan mikroorganisme yang hidup dengan yang mati.

Salah satu cara untuk lebih memahami, keragaman kehidupan mikroorganisme di dalam tanah ialah dengan menilai peranan yang dimainkan oleh berbagai kelompok mikroba proses perubahan-perubahan kimiawi di dalam tanah.

Populasi mikroorganisme di dalam tanah terbagi menjadi tiga golongan besar, yaitu :

- a) Golongan **autotonus**, yaitu golongan mikroorganisme yang selalu tetap didapatkan di dalam tanah dan tidak tergantung pengaruh-pengaruh lingkungan luar seperti iklim, suhu dan kelembaban.
- b) Golongan **zimogenik**, yaitu golongan mikroorganisme yang kehadirannya di dalam tanah diakibatkan oleh adanya pengaruh-pengaruh baru dari luar. Misalnya karena adanya penambahan senyawa organik.

- c) Golongan **transien**, yaitu golongan mikroorganisme yang kehadirannya bersamaan dengan penambahan mikroorganisme secara disengaja, misalnya dalam bentuk inokulum atau sediaan mikroorganisme hidup berupa *Rhizobium* atau *Azotobacter* ke dalam tanah.

Akhir-akhir ini, perhatian ditujukan pada sifat kimia air tanah dan potensial pencucian polutan dan perpindahannya dalam “akuifer” air tanah, mengarah pada peran mikroorganisme pada lapisan ‘deep subsurface’. lingkungan daratan. “*Deep soil subsurface*”, yang terletak beberapa ratus meter di bawah permukaan tanah, secara biologi bukan merupakan tanah kosong. Berbagai mikroorganisme, khususnya bakteri, terdapat pada sebagian besar lapisan tersebut. Dari hasil pengumpulan sampel pengeboran sedalam kurang dari 300 meter, dapat ditemukan bakteri, dan kenyataannya bahwa beberapa organisme yang diisolasi tidak memperlihatkan hubungan erat dengan organisme yang terdapat pada lapisan tanah paling atas.

Mikroorganisme pada lapisan ini dianggap memiliki kaitan dengan peran nutrisi karena aliran air tanah melalui habitatnya, dari hasil pengukuran aktivitasnya diperkirakan bahwa kecepatan metabolisme bakteri ini cukup rendah dalam habitat alamnya. Dibandingkan dengan mikroorganisme yang terdapat pada lapisan tanah bagian atas, signifikansi geobiokimia mikroorganisme tersebut kecil. Bagaimanapun, terdapat bukti bahwa aktivitas metabolisme mikroorganisme terkubur tersebut pada periode yang sangat panjang mampu melakukan mineralisasi senyawa organik dan melepaskan produknya ke dalam air tanah. Kemampuan mikroorganisme tersebut dalam hal katabolisme senyawa toksik yang terlepas dari tanah ke dalam air tanah (misalnya, benzen, bahan kimia pertanian, dll), saat ini menjadi perhatian khusus.

b. Peranan Mikroorganisme Dalam Tanah

Mikroorganisme tanah berfungsi merubah senyawa kimia di dalam tanah, terutama perubahan senyawa organik yang mengandung karbon, nitrogen, sulfur dan fosfor menjadi senyawa anorganik. Proses ini disebut mineralisasi, di dalamnya terlibat sejumlah besar perubahan senyawa kimia serta peranan bermacam-macam spesies mikroba. Rangkaian reaksinya dapat digambarkan sebagai suatu proses siklik yang dapat diawali misalnya dengan suatu unsur nitrogen, yang mengalami sederetan perubahan dari persenyawaan anorganik menjadi organik. Kemudian nitrogen itu dibebaskan dari protein dan proses tersebut berulang kembali. Salah satu proses

siklik semacam itu yang dipahami paling baik ialah yang menggambarkan transformasi nitrogen beserta persenyawaannya.

Peranan penting mikroorganisme, baik di bidang ilmu tanah, ilmu pertanian dan bidang-bidang lain adalah dalam siklus mineral, yang terdiri dari: karbon, fosfor, sulfur dan siklus nitrogen, setiap siklus mempunyai jalur tersendiri

C. PELINDIHAN BIJIH LOGAM OLEH MIKROBA (*MICROBIAL LEACHING*)

Bakteri asidofilik memainkan peran penting dalam pencucian atau pelindihan bijih logam dan produksi asam. Sulfida dengan sejumlah logam membentuk mineral yang sangat susah larut, dan sejumlah bijih yang digunakan sebagai sumber logam tersebut adalah sulfida. Jika konsentrasi logam rendah dalam bijih, secara ekonomik tidak layak mengumpulkan mineral dengan cara konvensional, menggunakan bahan kimia. Dalam keadaan demikian, sering dilakukan “microbial leaching”. Cara ini khususnya digunakan untuk bijih tembaga (Cu), karena CuS yang dibentuk selama oksidasi CuS bersifat mudah larut dalam air. Sudah kita ketahui bahwa sulfida sendiri, HS⁻ dapat teroksidasi secara spontan dalam udara. Sebagian besar sulfida logam juga dapat teroksidasi secara spontan, tetapi kecepataannya sangat rendah jika dibandingkan dengan sulfida bebas.

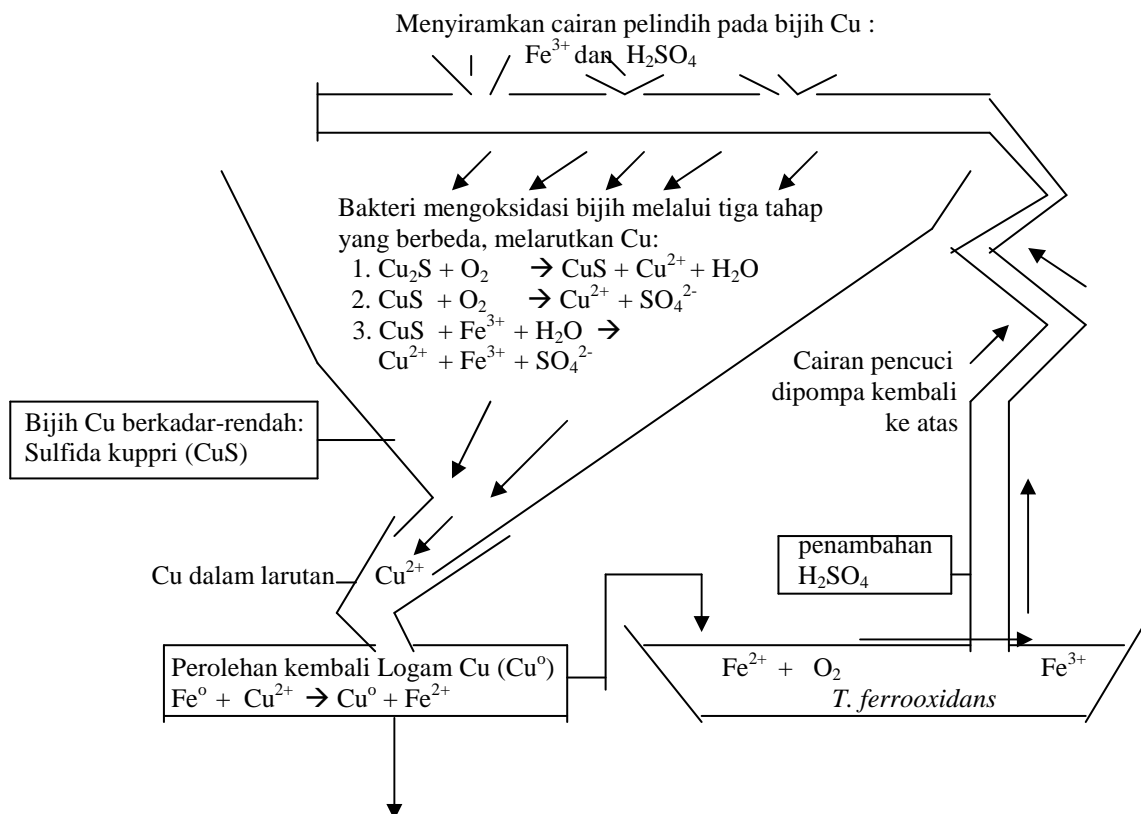
Bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* mampu mengkatalisis lebih cepat dari kecepatan oksidasi mineral sulfida. Kerentanan terhadap oksidasi juga berbeda pada berbagai mineral, dan mineral yang mudah teroksidasi ialah sebagian besar mineral yang dapat meluruh dengan “microbial leaching”. Jadi bijih sulfida kupri dan besi seperti pirotit (FeS) dan kovelit (CuS) mudah diluruhkan, sedangkan bijih timah dan molibdenum lebih sulit.

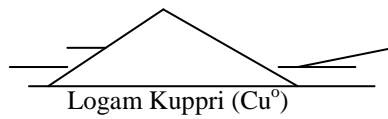
Pada umumnya proses “microbial leaching”, bijih berkadar logam- rendah dikumpulkan menjadi suatu gundukan besar, dan diencerkan dengan larutan asam sulfat (pH sekitar 2) dengan cara mengalirkannya kepada gundukan tersebut. Cairan yang dihasilkan pada bagian dasar gundukan, banyak mengandung mineral, dikumpulkan dan dipindahkan ke suatu tempat presipitasi, dimana logam direpresipitasi dan dimurnikan. Selanjutnya cairan dipompa kembali ke bagian paling

atas gundukan, dan siklus tadi diulang kembali. Sebanyak yang dibutuhkan, ditambahkan asam lagi untuk memelihara pH rendah.

Terdapat beberapa mekanisme dimana bakteri dapat mengkatalisis oksidasi mineral sulfida. Untuk menggambarkan reaksinya digunakan dua mineral Cu, yaitu kalkosit (Cu_2S), Cu disini bervalensi +2, dan kovelit (CuS) Cu bervalensi +1. Seperti digambarkan pada Gambar 11-2, *Thiobacillus ferrooxidans* mampu mengoksidasi Cu^+ dalam kalkosit (Cu_2S) menjadi Cu^{2+} , kemudian sejumlah Cu dibuang dalam bentuk terlarut, Cu^{2+} , dan membentuk mineral konelit. Catatan dalam reaksi ini, tidak terjadi perubahan kovalen pada sulfida, kelihatannya bakteri menggunakan reaksi Cu^+ menjadi Cu^{2+} sebagai sumber energi.

Mekanisme kedua, dan bagian terpenting dalam sebagian besar pelaksanaan proses, melibatkan suatu oksidasi bijih Cu secara tidak langsung dengan ion ferri yang dibentuk melalui oksidasi ion ferro oleh bakteri. Hampir semua bijih, terdapat pirit, dan oksidasi pirit ini menyebabkan pembentukan ion ferrik. Besi ferri merupakan oksidan terbaik untuk mineral sulfida, dan reaksi CuS dengan besi ferri menghasilkan solubilisasi dan pembentukan besi ferro. Dengan adanya O_2 , juga nilai pH asam, *Thiobacillus ferrooxidans* mengoksidasi kembali besi ferro menjadi bentuk ferri, jadi keadaan ini dapat mengoksidasi Sulfida Kupri lebih banyak. lebih banyak .





Gambar 11.2 Perencanaan pelindihan gundukan dan reaksi yang dilibatkan dalam “*microbial leaching*” mineral kupri sulfida (Sumber : Brock & Madigan,1991)

D. MIKROBIOLOGI LIMBAH

1. POLUTAN

Limbah atau bahan buangan dapat berbentuk cair, padat, dan gas. Dalam limbah terdapat polutan atau bahan pencemar yang mempengaruhi kualitas lingkungan yang menerimanya. Hampir semua bahan yang dihasilkan manusia dapat dianggap sebagai polutan. Bahan lain seperti produk pertanian, tanah yang lepas dari sumbernya, unsur penting dalam kehidupan (Cu, Zn) dapat bersifat toksik, jika terdapat dalam jumlah yang besar dalam lingkungan.

Terdapat sekitar 1500 bahan sebagai polutan dalam perairan, umumnya yang tertera dalam Tabel 11-11. Sebagai contoh, limbah domestik, dapat mengandung bahan-bahan yang dapat teroksidasi, deterjen, nutrisi, logam, patogen dan berbagai senyawa lain.

Tabel 11.1 Kelompok polutan yang ditemukan dalam lingkungan perairan.

Asam dan basa Anion (contohnya, sulfida, sulfit, sianida) Deterjen Limbah domestik dan pupuk pertanian Limbah pengolahan pangan (termasuk proses pengolahan di kebun) Gas (contohnya Klorin, amonia) Panas Logam (contohnya, Cd/kadmium, Zn/seng, Sn/timah) Minyak dan minyak yang tersebar. Limbah toksik organik (contohnya, formaldehid, fenol) Patogen Pestisida PCBs Radionuklida

Apapun bentuknya, suatu senyawa akan menyebabkan efek pada suatu organisme atau komunitas bergantung pada konsentrasi dan waktu kontak senyawa

tersebut (misalnya, dosis). Efek suatu polutan pada organisme target dapat bersifat akut dan/atau kronik. Efek akut terjadi secara cepat, sering mematikan dan jarang dapat diperbaiki. Efek kronik berkembang setelah kontak lama dengan dosis rendah atau lama setelah kontak dan pada akhirnya menyebabkan kematian. Dosis subletal mengakibatkan kerusakan proses fisiologis atau tingkah laku organisme (contoh, pertumbuhan kurang baik atau kegagalan berreproduksi).

Pada tingkat komunitas atau ekosistem, efek polusi tersebut tidak mungkin sama seperti pada tingkat organisme di atas, akan menyebabkan efek irreversibel (tidak dapat diperbaiki), kecuali dalam kasus polusi radioaktif. Efek polusi tersebut dicatat dengan hilangnya beberapa spesies, dengan keuntungan bagi yang lainnya, secara umum terjadi penurunan diversitas (keragaman), tapi tidak dalam jumlah individu spesies, dan terjadi perubahan keseimbangan proses: predasi, kompetisi dan siklus materi.

2. TIPE POLUTAN

a. Polutan Toksik

Tipe utama polutan toksik diantaranya sebagai berikut:

- 1). Logam, seperti nikel (Ni), cadmium (Cd), seng (Zn), tembaga (Cu) dan merkuri (Hg), ditambah dari beberapa proses industri dan pertanian. Istilah “logam berat” kurang tepat, tetapi termasuk sejumlah besar logam dengan nomor atom lebih besar dari 20, tetapi tidak termasuk logam alkali, ‘alkaline earths’, lantanida dan aktinida.
- 2) Senyawa organik, seperti pestisida organoklorin, herbisida, PCBs (*polychlorinated biphenyls*), hidrokarbon alifatik terklorinasi, pelarut, rantai-lurus ‘surfactants’ (contoh, deterjen), *petroleum hydrocarbon*, *polynuclear aromatics*, dibenzodioxin terklorinasi, senyawa organometalik, fenol, formaldehid. Bahan-bahan tersebut berasal dari berbagai industri, pertanian, dan beberapa sumber domestik.
- 3) Gas, seperti klorin dan amonia.
- 4) Anion, seperti sianida, fluorida, sulfida dan sulfit.
- 5) Asam dan basa.

Beberapa senyawa toksik potensial, misalnya logam berat, secara terus menerus dilepaskan ke dalam lingkungan akuatik dari proses alam seperti aktivitas vulkanik dan kerusakan batuan, juga sejumlah kecil unsur penting (misalnya, Cu, Zn). Proses industri sangat meningkatkan mobilisasi beberapa logam, sedangkan kecepatan pembuangan senyawa organik dari pabrik, meningkat secara eksponensial sejak tahun 1950-an, diperkirakan sekitar $2,2 \times 10^9$ kg pestisida yang digunakan secara global.

b. Logam Berat dan Organoklorin

Sebagian besar polutan yang disebutkan di atas, sejauh ini dapat merusak lingkungan alami dan sumber daya manusia, tetapi hanya penyakit yang ditularkan melalui air yang terkontaminasi fekal yang secara luas menyebabkan kematian manusia. Ketika senyawa kimia diketahui memiliki efek toksik terhadap hewan laboratorium, dibuat standar yang sangat ketat untuk keberadaannya dalam air. Terdapat bukti bahwa logam berat dan organoklorin pada tingkat tertentu dalam lingkungan dapat membahayakan kesehatan manusia. Logam berat merupakan polutan konservatif dan tidak dapat diuraikan, atau dapat diuraikan dalam waktu yang lama, maka keberadaannya menjadi bertambah kekal dalam lingkungan akuatik. Logam berat dapat berakumulasi dalam organisme dan dapat membesar jumlahnya dalam rantai makanan. Sebagian besar jalur perolehannya untuk organisme akuatik secara langsung dari air, jadi, untuk suatu tingkat konsentrasi tertentu dalam jaringan, mencerminkan keberadaannya dalam air. Karnivora berada paling atas pada rantai makanan, seperti burung, mamalia, termasuk manusia, memperoleh polutan terbesar dari ekosistem akuatik melalui makanannya, khususnya ikan, jadi keberadaan logam berat potensial mengalami biomagnifikasi.

1). Logam Berat

Logam berat yang secara luas menjadi perhatian terhadap kesehatan manusia adalah, merkuri, kadmium, dan timah. Nriagu, 1988. (dalam Mason, 1991), menganggap bahwa lebih dari 1 milyar (10^9) manusia secara langsung terpapar oleh meningkatnya konsentrasi logam toksik dan bahan yang mengandung logam dalam lingkungan dan beberapa juta manusia dapat menderita keracunan logam secara subklinik.

Merkuri (Hg). Pencemaran lingkungan oleh logam berat, menjadi terkenal luas dengan adanya bencana Minamata di Jepang pada awal tahun 1950-an. Pada tahun 1932 pabrik yang menghasilkan asetaldehid dan vinil klorida mulai menggunakan '*mercuric oxide*' sebagai katalis dan limbah yang mengandung merkuri dibuang ke dalam teluk Minamata. Makanan laut merupakan makan utama sebagian besar penduduk lokal. Pada awal 1950-an, penyakit syaraf mulai berpengaruh pada anjing, kucing, babi dan beberapa hewan tersebut mengalami kematian. Pada tahun 1956 pertama kali dilaporkan kasus yang terjadi pada manusia, anak perempuan menderita kesulitan berbicara. Sejumlah kasus yang sama sudah dideteksi setelah beberapa bulan berikutnya dan suatu tim peneliti diturunkan, yang menyatakan bahwa penyebab sakit tersebut adalah, setelah mengkonsumsi makanan-laut dari teluk Minamata.

Pada tahun 1958, sejumlah larangan ditujukan pada penjualan ikan dari teluk Minamata, meskipun tidak dilarang untuk memancing ikan. Tidak ada pengendalian pada pabrik penyebab polusi.

Konsentrasi merkuri dalam lumpur dan saluran pembuangan pabrik setinggi 2000 mg/kg berat basah dan dalam endapan di teluk Minamata sekitar 10-100 mg/kg berat basah. Tingkat merkuri dalam ikan dan kerang sekitar 5-40 mg/kg berat basah. Keadaan tersebut berakhir pada tahun 1959, pabrik pembuat memiliki alasan untuk percaya bahwa air limbah menyebabkan penyakit Minamata, tetapi informasi tersebut disimpan. Buangan merkuri dihentikan ketika unit produksi pabrik menjadi tidak ekonomis. Pada tahun 1975 terdapat 800 kasus penyakit Minamata, dengan penderita selanjutnya sekitar 2800. Penyakit ini membunuh 107 orang.

Terdapat dua sumber merkuri yang secara alami memasuki lingkungan. Pelapukan batuan yang mengandung-merkuri melepaskan 3500 ton/tahun dan 25.000-150.000 ton/tahun dilepaskan sebagai gas dari daerah vulkanik. Dari bahan bakar-fosil melepaskan 3.00 ton/tahun. Produksi merkuri dunia sekitar 10.000 ton/tahun dan digunakan dalam berbagai keperluan (komponen elektronik, dan industri klor-alkali), yang menggunakan merkuri sebagai katoda dan menghasilkan elektrolit klorin dan natrium hidroksida.

Industri tersebut dapat mencemari sungai dan danau. Industri kertas dan pulp sebelumnya menggunakan merkuri sebagai selenisida, yang sekarang jarang

digunakan. Cat, obat-obatan, bahan untuk perbaikan gigi, ketepatan alat, fungisida dalam pertanian dan perkebunan, juga menggunakan merkuri dan berpotensi menghasilkan pencemaran lingkungan.

Tabel 11.12 Kandungan merkuri rata-rata ($\mu\text{g}/\text{kg}$ berat basah) pada tingkat rantai makanan di danau Paijanne, Finlandia.

Bahan	Konsentrasi merkuri
Endapan	87-114
Fitoplankton	15
Tumbuhan tinggi	9
Zooplanton	13
Zoobentos herbivor	77
Zoobentos karnivor	83
Ikan herbivor	332-500
Ikan karnivor	604-1510
Itik insektivor	240
Burung piskivor (pemakan ikan)	2512-13685

Kadmium (Cd). Jepang, juga merupakan negara pertama yang dilaporkan mengalami kasus keracunan kadmium pada lingkungan. Pada tahun 1955 seorang ahli melaporkan suatu penyakit, yang disebut '*itai-itai*' (aduh-aduh sakit), ditandai dengan rasa sakit yang meluas pada bagian belakang dan sendi, suatu gaya berjalan mirip-bebek, lesi ginjal, protein dan gula ditemukan dalam urin, dan dekalsifikasi tulang, kadang-kadang diikuti berbagai patahan. Penyakit ini banyak dialami wanita berusia di atas 40 tahun. Ditemukan bahwa pabrik yang melepaskan larutan ke dalam sungai Jintsu, yang aliran airnya digunakan untuk irigasi persawahan. Penderita ditemukan pada daerah tersebut. Sekitar 200 orang menderita penyakit tersebut, dan setengahnya mengalami kematian.

Produksi kadmium dunia sekitar 15.000 ton/tahun, yang digunakan dalam 'elektroplating', sebagai pigmen, dan stabilizer untuk plastik. Buangan tambang, lumpur-limbah yang digunakan untuk penyaring fosfat dan lahan juga signifikan sebagai sumber pencemar.

Kadmium bersifat sangat toksik untuk semua bentuk kehidupan, khususnya cladoceran yang bersifat sensitif. Sebagai contoh, dilaporkan LC_{50} 0,03 mg Cd/l untuk *Daphnia magna*, yang tersedia sebagai organisme uji. Percobaan dalam waktu yang lama dilakukan untuk menentukan "tingkat efek-tidak-toksik", untuk *D. magna* yaitu 0,37 $\mu\text{g}/\text{l}$.

Dilaporkan efek subletal toksisitas kadmium pada populasi ikan. 'Perc' (*Perca fluviatilis*) dari sebuah sungai di Swedia yang tercemar kadmium, menandakan peningkatan jumlah limfosit, anemia ringan dan perubahan kadar magnesium dan kalium dalam darah. Residu kadmium dalam hati Perc terlihat 6-8 kali dibandingkan organisme kontrol. Meskipun bioakumulasi kadmium dalam jaringan tidak meningkat sepanjang rantai makanan. Kadar kadmium dalam daging ikan umumnya kurang dari 0,5 mg/kg berat basah, kadar yang lebih tinggi diperkirakan terdapat dalam ginjal dan hati.

Paparan Kadmium dalam waktu yang lama, menyebabkan kerusakan ginjal manusia. Protein diekskresikan ke dalam urin dan dapat terjadi kerusakan yang permanen. Kadar ambang-batas kadmium yang berhubungan dengan kerusakan ginjal adalah 200 µg /g, yang diperoleh pada tingkat yang rendah sejalan dengan peningkatan waktu. Nriagu, 1988, memperkirakan lebih dari 500.000 orang dapat mengalami risiko kerusakan ginjal diakibatkan-kadmium, ikan air tawar dianggap bukan satu-satu sumber kontaminan.

Timah (Sn). Pada pertengahan tahun 1980-an, sekitar 3,3 juta ton timah dihasilkan secara tetap di seluruh dunia, meningkat 22 % dari 1960-an. Logam ini banyak digunakan pada pipa, baterai, cat, dll., dan timah tetra-etil digunakan sebagai pelengkap minyak bumi. Logam ini sudah menyebarkan dalam lingkungan, dengan pencemaran meningkat tajam mulai tahun 1950-an, bahkan pada daerah yang tidak terjangkau, dengan pertumbuhan dalam bidang automobil.

Kadar timah dalam organisme, faktor biokonsentrasi dalam lumut, terdapat sekitar 3.000-5.000. Kelihatannya tidak mengalami biomagnifikasi sepanjang rantai makanan. Burung yang hidup di perairan merupakan kelompok terbesar yang dipengaruhi oleh pencemaran kronik lingkungan akuatik oleh timah.

Suatu larangan penggunaan timah untuk memancing dengan sukarela diperkenalkan pada tahun 1985 dan larangan tersebut menjadi undang-undang pada tahun 1987. Manusia menggunakan timah untuk beberapa keperluan sejak jaman purbakala, dan menyebar secara luas pada masa Romawi, dan jatuhnya kekaisaran Romawi dianggap karena akibat keracunan timah.

Paparan timah pada tingkat yang relatif rendah rendah berhubungan dengan gangguan metabolisme dan neurofisiologi, termasuk anemia, dan rendahnya IQ.

Khususnya berisiko pada anak-anak. Nilai ambang-batas yang mempengaruhi kesehatan di Amerika Serikat, sudah ditentukan yaitu pada konsentrasi 250-300 $\mu\text{g}/100$ ml darah. Dengan perkiraan tersebut 590.000 anak kecil di negara tersebut memiliki kadar yang melebihi dan beberapa menderita keracunan timah. Hasil penelitian saat ini, kadar timah dalam darah lebih rendah dari 25 $\mu\text{g}/100$ ml dapat berpengaruh terhadap anak-anak. Selanjutnya kelainan tingkah laku pada anak-anak, berhubungan dengan penambahan kadar timah, sudah diperlihatkan menjadi permanen dan mempengaruhi keberhasilan masa-hidup seseorang.

Air keran secara signifikan merupakan sumber timah dan di Amerika Serikat mengizinkan konsentrasi timah dalam air minum sekitar 50-20 $\mu\text{g}/\text{l}$, masyarakat Eropa juga membatasi kadar timah dalam air minum sekitar 50 $\mu\text{g}/\text{l}$.

2). Organoklorin

Insektisida organoklorin dan PCBs (*polychlorinated biphenyls*) bersifat hidrofobik, terlarut-lemak, secara biologik stabil, sehingga terakumulasi dalam lemak tubuh. Organoklorin juga berbiomagnifikasi sepanjang rantai makanan dan faktor konsentrasi dari air sampai predator tertinggi, seperti dolpin, setinggi 10^7 . Organoklorin yang menyebar mengalami penurunan pada karnivor tersebut. Penyebaran melalui udara dan air menyebabkan pencemaran ke daerah terpencil dari sumber produksi atau pengguna.

Pelarangan terhadap penggunaan organoklorin dan PCBs berkembang di dunia mulai dua dekade terakhir. Tetapi konsentrasi dari pengguna langsung dan secara historik cukup tinggi menjadi masalah untuk spesies yang sensitif. Sebagai contoh, pada tahun 1978, 18.670 ton DDT, 43 ton dieldrin, dan 9994 ton lindan digunakan dalam program pengendalian nasional untuk vektor penyakit. Penggunaan DDT dan lindan diperkirakan meningkat dua kali pada tahun 1987, DDT melebihi 50% penggunaan insektisida untuk vektor penyakit. Sebagian besar insektisida ini memasuki ekosistem perairan.

Pestisida. Pestisida dapat memasuki ekosistem perairan dalam aliran dari lahan pertanian. Limbah dan cairan industri merupakan sumber lain pestisida, sedangkan dari atmosfer, karena presipitasi dalam air hujan merupakan jalur terbesar masuknya pestisida. Aerosol yang dihasilkan selama penyemprotan-tanaman dapat

disebar-luaskan oleh angin, sumber tak-terduga yang secara nyata memasuki lingkungan perairan.

Toksisitas organoklorin terhadap ikan cukup tinggi. Sebagai contoh, 96-jam LC_{50} DDT terhadap berbagai spesies ikan sekitar 1-30 $\mu\text{g/l}$; nilai tersebut sama untuk invertebrata. Kriteria tersebut diajukan oleh '*the US Environmental Protection Agency*' untuk melindungi lingkungan perairan, nilai maksimum 0,001 $\mu\text{g/l}$, dengan memperhitungkan potensial biomagnifikasi. Pada konsentrasi subletal, pestisida organoklorin menyebabkan gangguan pendengaran, kelambatan refleks, dan penurunan daya reproduksi.

Populasi manusia, tentunya juga dapat dicemari pestisida organoklorin. Sebagai contoh, susu mentah di Hong Kong mengandung konsentrasi DDT dan DDE sekitar 0,67-4,04 dan 4,07-22,96 mg/kg berat lemak. Tingginya nilai tersebut, juga dilaporkan terjadi pada makanan laut yang dikonsumsi etnik Cina. Data terbaru untuk 20 negara, konsentrasi DDT (mg/kg berat lemak) dalam susu mentah sekitar 1,7 (Australia), sampai 19,5 (India), dari tujuh negara mengandung 10 mg/kg berat lemak.

Konsentrasi DDT maksimum yang diijinkan dalam makanan olahan manusia adalah 0,74 mg/kg, untuk susu mentah lebih rendah dua kali dari standar tersebut. Hal ini memungkinkan bahwa, pada kasus dimana konsentrasi organoklorin dalam susu mentah tinggi, sebagai makanan tambahan untuk bayi terlalu banyak mengandung organoklorin karena penambahan sejumlah bahan kontaminan.

PCBs. PCBs merupakan senyawa kimia dengan stabilitas tinggi, flamabilitas (kemudahan terbakar) rendah, komponen terkonduksi-panas yang baik, tetapi konduktivitas elektrik rendah dan konstanta elektrik tinggi. Komponen yang dimilikinya menyebabkan PCBs banyak digunakan untuk '*transformers*' dan '*capacitors*', juga digunakan dalam '*heat exchangers*', sistem hidraulik, pompa vakum, dan dalam '*lubricating oils*', dan sebagai '*plasticizers*' dalam cat dan tinta. PCBs masuk ke dalam lingkungan melalui sistem terbuka, daerah pemukiman, pembakaran limbah dan cairan limbah, dan menyebar di atmosfer. Meskipun dilarang digunakan tetapi diperkirakan 780 x 10³ ton PCBs digunakan dalam alat-alat listrik, di perumahan atau di gudang-gudang penyimpanan.

PCBs terdapat secara luas sebagai '*congeners*', toksisitasnya sangat bervariasi dengan jumlah atom klorin dan posisi penggantinya pada cincin bifenil. Khususnya, PCBs coplaner bersifat toksik. Congeners yang kurang toksik mudah mengalami metabolisme dalam tubuh karnivor tertinggi pada rantai makanan, tetapi jika termakan akan lebih toksik karena ikan kurang mampu memetabolisme congeners yang lebih toksik. PCBs secara komersil mengandung kontaminan, seperti dioksin, dan dibenzofuran, dan zat tersebut dapat memberikan efek, dan saat ini menjadi polutan global.

Paparan PCBs terhadap ikan menyebabkan gangguan perkembangan dan reproduksi. Di Laut Baaltik dan Netherland, populasi anjing laut menurun dan memperlihatkan penurunan tingkat reproduksi, juga menyebabkan gejala patologik, termasuk bisul intestinal, hiperplasia adrenal, kulit tipis dan patah cakar dan tulang. Dapat disimpulkan bahwa perubahan patologik hiperplasia adrenokortikal, menghasilkan ketidakseimbangan hormon dan merusak sistem imun. Imunosupresi menyebabkan mudah terinfeksi. Sehingga untuk kepentingan kesehatan manusia, hal ini harus menjadi bahan perhatian khusus.

3). Minyak Bumi

Terjadinya polusi minyak dalam perairan dan efeknya terhadap makhluk hidup, kurang mendapat perhatian dibandingkan dengan polusi minyak yang terjadi di ekosistem laut. Dalam ekosistem laut polusi minyak terbesar dihasilkan oleh pengoperasian dan kecelakaan tanker, kejadian pada instalasi produksi kurang nyata.

Sulit memperkirakan efek toksik potensial minyak, karena minyak memiliki sifat kimia yang sangat kompleks. Minyak mentah ("*crude oil*") tersusun oleh beribu molekul organik yang berbeda, sebagian besar hidrokarbonnya antara 4-26 atom/molekul. Juga mengandung senyawa sulfur dan nitrogen, logam (vanadium). Minyak dari sumber yang berbeda memiliki komposisi yang sangat berbeda. Tiga tipe utama hidrokarbonnya adalah alkan (contohnya, etan, propan, butan), sikloheksan (naften) dan aromatik (contohnya, benzen, toluen, naftalen).

Minyak mentah mengalami penyulingan melalui proses distilasi penting, yang memisahkan bagian yang berbeda dengan peningkatan titik didih. Pada suhu yang lebih rendah, senyawa tersebut digunakan untuk menghasilkan minyak tanah. Pada suhu yang lebih tinggi, nafta, yang merupakan bentuk dasar industri

petrokimia, dan selanjutnya suhu didih yang lebih tinggi berhenti pada minyak disel, minyak bunker, dan ter. Penyulingan selanjutnya, sering menghasilkan produk komersial. Produk minyak juga dapat mengandung senyawa toksik seperti PAHs (*polynuclear aromatic hydrocarbons*), PCBs, logam, khususnya timah.

Efek Minyak Terhadap Biota

Hewan dan tumbuhan dapat dipengaruhi oleh komponen fisik minyak terapung, mencegah respirasi, fotosintesis atau pengambilan makanan. Vertebrata yang lebih besar yang terselimuti minyak akan kehilangan kemampuan mengapung dan mengisolasi, sedangkan penelanan minyak, sering disebabkan karena usaha untuk membersihkan bulu (burung, binatang), yang bersifat racun. Beberapa komponen minyak mentah yang terlarut-air dan produk penyulingan, bersifat toksik terhadap organisme, telurnya, dan fase awal pertumbuhan, khususnya yang rentan. Juga terdapat suatu rentang jumlah efek subletal pada komponen tersebut.

Prinsip efek pembuangan minyak terhadap komunitas mikroorganisme merupakan salah satu stimulasi, khususnya pada organisme heterotrofik yang menggunakan hidrokarbon. Shale et. Al. (1989), menyimpulkan bahwa alga bersifat kurang sensitif terhadap efek langsung dari minyak dibandingkan dengan organisme lain, tetapi sensitif terhadap efek sekundernya. Hal ini termasuk peningkatan dalam produksi primer yang disebabkan oleh kematian, dekomposisi, dan pelepasan nutrisi dari spesies sensitif, suatu peningkatan dalam produksi primer melalui organisme penambat-nitrogen atau, dalam keadaan tidak adanya organisme tersebut, suatu penurunan dalam produksi primer.

Beberapa komponen minyak dan produk minyak, khususnya hidrokarbon aromatik polisiklik, dari hasil penelitian di laboratorium diketahui bersifat mutagenik dan karsinogenik, maka sebaiknya harus ada perhatian terhadap peran potensialnya dalam lingkungan, khususnya ketika memasuki persediaan air minum. Mix (1986), menganggap bahwa terdapat hubungan antara polutan dengan pertumbuhan yang abnormal, hanya satu yang memperlihatkan hubungan antara tumor pada ikan dengan derajat polusi, polutan tersebut berupa toluen, minyak mentah dan beberapa hidrokarbon aromatik polisiklik. Karena sejumlah produk minyak dianggap berkemampuan mutagenik dan karsinogenik tinggi, maka perlu penelitian lebih

lanjut untuk memperkirakan risikonya terhadap komunitas perairan dan terhadap manusia.

2. Polutan Organik

Polusi organik terjadi ketika senyawa organik dalam kuantitas yang besar, yang berperan sebagai substrat untuk mikroorganisme, dilepaskan ke dalam lingkungan khususnya lingkungan perairan (anak sungai atau badan air). Selama proses dekomposisi, kecepatan penggunaan oksigen terlarut dalam air tersebut lebih besar dibandingkan dengan pengisiannya kembali, menyebabkan kurangnya oksigen, yang sangat mempengaruhi biota dalam sungai. Larutan organik juga sering mengandung sejumlah besar padatan dan akan mengurangi tersedianya cahaya untuk organisme fotosintetik dan pada bagian bawah, merubah karakteristik dasar sungai, dan membuatnya menjadi habitat yang tidak layak untuk beberapa organisme. Sering terdapat amonia yang menambah toksisitas air.

Ukuran sederhana materi biologik pengoksidasi potensial untuk pemakaian oksigen air ditentukan oleh BOD (*'biochemical oxygen demand'*), dengan kata lain BOD adalah sejumlah oksigen terlarut (DO) yang dikonsumsi oleh mikroorganisme untuk oksidasi bahan organik dan anorganik. BOD diukur di laboratorium, dengan cara menginkubasi sampel air selama lima hari pada suhu 20°C dan menentukan penggunaan oksigen.

Cara tersebut memperkirakan potensial polusi suatu air limbah yang mengandung suatu sumber karbon organik, melalui pengukuran sejumlah oksigen yang digunakan oleh mikroorganisme indigenus dalam suatu sampel standar. BOD memiliki suatu ukuran luas efek polusi organik terhadap suatu penerimaan air. Metode untuk menentukan BOD terdapat dalam American Public Health Association et al. (1985), sedangkan dasar pemikiran, perkembangan dan batas-batas uji dibahas oleh Ellis (1989). Larutan dengan BOD tinggi dapat menyebabkan suatu masalah besar dalam air sungai yang menerimanya.

Polutan organik terdiri dari protein, karbohidrat, lemak, dan asam nukleat dalam banyak kombinasi. Buangan organik dari manusia dan hewan juga dapat meningkatkan penyebab-penyakit (patogenik) organisme.

a. Asal Polutan Organik

Polutan organik berasal dari buangan domestik (bahan mentah dan masakan), aliran dalam kota, larutan (perdagangan) industri, limbah peternakan dan limbah pertanian.

Larutan kotor merupakan sumber bahan organik terbesar yang dibuang ke dalam air bersih. Sumber buangan dapat dialirkan dari restoran, sisa air pencucian, rumah sakit dan sumber lain.

Di daerah perkotaan, aliran dari rumah, jalan dan pabrik dapat menyebabkan polusi yang berat, khususnya pada keadaan angin besar/badai setelah musim panas.

b. Peranan Mikroorganisme Dalam Air-Limbah

Dalam air limbah misalnya air selokan, air sungai atau air buangan lainnya, akan didapatkan beberapa kelompok mikroorganisme seperti yang ditemukan pada air jernih (tetapi tidak steril), juga ditambah kelompok lain, yaitu :

- (1). Kelompok patogen misalnya, penyebab penyakit tifus, kolera, disentri, dan sebagainya;
- (2). Kelompok penghasil-racun, misalnya mikroba penghasil toksin penyebab keracunan makanan;
- (3). Kelompok bakteri pencemar, misalnya bakteri golongan Coli yang kehadirannya di dalam badan air dapat menunjukkan bahwa air tersebut sudah terkontaminasi-fekal (feses manusia, hewan);
- (4). Kelompok bakteri pengguna, yaitu kelompok bakteri yang mampu mengurai senyawa-senyawa tertentu . Beberapa kelompok bakteri yang diketahui sebagai pengguna residu pestisida, residu minyak bumi, residu deterjen, dan sebagainya.

(1). Mikroorganisme Patogen

Pencemaran materi fekal dapat memasukkan berbagai patogen ke dalam jalur-air, termasuk bakteri, virus, protozoa dan cacing parasit. Penyakit “air-buangan/limbah” tetap merupakan buangan berbahaya utama pada beberapa bagian dunia. Cairncross dan Feacham (1983) dalam Bitton, 1994), mengamati empat kelas penyakit yang berhubungan dengan air, yaitu :

Kelas 1, penyakit air-limbah, ditularkan melalui air minum yang mengandung organisme patogenik, biasanya disebabkan kontaminasi fekal. Contohnya termasuk kolera, tifoid dan hepatitis A.

Kelas 2, penyakit infeksi tak-langsung yang berhubungan dengan cara hidup sehat seseorang (contoh, mencuci tangan), penyakit dapat dikurangi dengan penyediaan air yang cukup untuk mandi dan mencuci. Untuk mengendalikan penyakit ini, tersedianya air berkualitas merupakan alasan penting; pertimbangan kedua adalah pencapaian suatu kualitas bakteriologik tinggi (Ellis, 1989). Penyakit kelas kedua tersebut, adalah beberapa infeksi mata (contoh, trachoma) dan kulit (contoh, cacing gelang) dan penyakit yang dibawa oleh kutu dan tungau.

Kelas 3, merupakan penyakit yang disebabkan oleh cacing (cacing pita parasit) yang mengalami sebagian siklus hidupnya dalam air.

Kelas 4, merupakan penyakit yang membutuhkan suatu vektor insekta yang berhubungan dengan air (contoh, demam kuning, malaria, *river-blindness*, filariasis, penyakit ini dianggap tidak berhubungan dengan air yang berpolutan).

Tabel 11.13 Beberapa penyakit yang berhubungan dengan air dan mikroorganismen penyebabnya

	Organisme penyebab	Penyakit atau gejala	Sumber Utama
Bakteri	<i>Salmonella typhi</i> <i>S. paratyphi</i> <i>Salmonella spp.</i> <i>Shigella spp.</i> <i>Vibrio cholerae</i> <i>E. coli</i> enteropatogenik <i>Leptospira icterohaemorrhagiae</i> <i>Campylobacter jejuni</i> <i>Mycobacterium tuberculosis</i> <i>Yersinia enterocolitica</i> <i>Legionella pneumophila</i> Patogen oportunistik (<i>Pseudomonas, Aeromonas, Klebsiella, Flavobacterium, Enterobacter, Citrobacter, Serratia, Acinetobacter, Providencia dan proteus</i>). <i>Mycobacterium avium-intrasellulare</i>	Demam tifoid Demam paratifoid Gastroenteritis Disentri bakterial Kolera Gastroenteritis Penyakit Weil's (leptospirosis) Gastroenteritis Tuberkulosis Gastroenteritis Penyakit legionnare's (sakit pernafasan akut), gastrointestinal, saluran kemih dan sistem saraf. Berbagai infeksi pada bayi, orang tua.	Feses manusia Feses manusia Feses manusia Feses manusia Feses manusia Feses manusia Feses dan urin hewan Feses manusia dan hewan Eksudat respirasi manusia Feses manusia dan hewan Aerosol dari menara pendingin, kondensor evaporasi, penguap dan shower. Juga dari sistem distribusi air di rumah sakit. Sistem distribusi air minum rumah sakit
Virus	A. Enterovirus Poliovirus serotipe 3 Coxsackievirus A serotipe 23 Coxsackievirus B serotipe 6 Echovirus serotipe 34 Enterovirus (68-71) serotipe 4 Hepatitis A virus (HAV) B. Reovirus serotipe 3 C. Rotavirus serotipe 4 D. Adenovirus serotipe 41 E. Norwalk agent (calicivirus) serotipe 1 F. Astrovirus serotipe 5	Paralisis, aseptik meningitis. Herpangia, aseptik meningitis, paralisis, demam, sakit s.respirasi. Pleurodynia, aseptik meningitis, perikarditis, nefritis, demam. Infeksi sal. Respirasi, diare, myokarditis, demam, dan ruam. Meningitis, sakit sal. pernafasan Hepatitis infeksius. Penyakit saluran pernafasan Gastroenteritis. Penyakit sal. Pernafasan, konjungtivitis akut, gastroenteritis Gastroenteritis.	Feses manusia-terinfeksi dalam air laut, kerang, distribusi air, tanaman pertanian, aerosol.

Protozoa	<i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia lamblia</i> <i>Naegleria fowleri</i> <i>Cryptosporidium sp.</i>	Disentri amoebik. Diare, malabsorpsi. Meningoencephalitis amoebik. Diare.	Feses manusia terinfeksi. Feses manusia terinfeksi. Kolam renang, air buangan pendingin, suplai air rumah tangga. Feses manusia dan hewan terinfeksi.
Cacing	<i>Taenia saginata</i> <i>Taenia solium</i> <i>Ascaris lumbricoides</i>	Infeksi cacing-pita sapi Infeksi cacing-pita babi Pneumonitis	Feses hewan terinfeksi. Feses hewan terinfeksi. Feses manusia terinfeksi.

(2). Mikroorganisme Penghasil-racun

Bakteri penghasil-racun atau enterotoksin/eksotoksin dapat mencemari badan air, misalnya spora *Clostridium perfringens*, *C. botulinum* dan *Bacillus cereus*, *Vibrio parahaemolyticus*, dan bakteri penghasil-racun lainnya. Spora atau bentuk vegetatif bakteri, dapat masuk ke dalam air melalui debu/tanah, kotoran hewan, makanan-limbah, dan sebagainya. Jika makanan atau air minum dan air bersih (MCK) tercemari air tersebut, maka dalam keadaan yang memungkinkan bakteri penghasil-racun akan mengeluarkan eksotoksin atau racunnya sehingga makanan, air susu, air minum jika dikonsumsi akan menyebabkan keracunan makanan.

(3). Mikroorganisme Pencemar

Materi fekal yang masuk ke dalam badan air, selain membawa bakteri patogen juga akan membawa bakteri pencemar yang merupakan flora normal saluran pencernaan manusia, misalnya *E. coli* dan kelompok coliform lain (Enterobacteriaceae, Enterococcus), yang kehadirannya dapat dipakai untuk indikator pencemaran air oleh materi fekal.

(4). Mikroorganisme Pengguna

Seperti sudah dijelaskan di atas, air-limbah dapat mengandung berbagai senyawa yang dapat digunakan sebagai substrat sebagai sumber energi dan untuk pertumbuhan berbagai mikroorganisme. Sebagai pengguna senyawa, mikroorganisme dapat menggunakan sumber nutrisi yang terdapat dalam air, seperti sumber nitrogen, fosfor, sulfur, dan sebagainya. Sebagai contoh, berbagai mikroorganisme, serta proses dan senyawa yang terlibat dalam siklus nitrogen dapat dilihat dalam Tabel 11-14.

Tabel 11.14 Jenis mikroorganisme , proses dan senyawa yang terlibat dalam siklus nitrogen.

Proses dan Jenis Mikroorganisme	Senyawa
<p>Mikroorganisme penambat-nitrogen nonsimbiotik :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Azotobacter agilis</i>, <i>A. chroococcum</i>, <i>A. vinelandii</i>. - <i>Clostridium</i>, <i>Klebsiella</i>. - <i>Anabaena</i>, <i>Nostoc</i> (cyanobacteria) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrogen - Nitrogen - Nitrogen
<p>Mikroorganisme penambat-nitrogen simbiotik :</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Rhizobium – leguminosa</i> - <i>Azospirillum</i> - akar jagung, rumput tropik - <i>Anabaena flos-aquae</i> - <i>Azolla</i> (jarang) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrogen - Nitrogen - Nitrogen
<p>Mineralisasi (Amonifikasi) Nitrogen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bakteri, actinomycetes, fungi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Protein → asam amino → deaminasi menjadi NH₄. - NH₄⁺ + H₂O → NH₃ + CO₂.
<p>Nitrifikasi :</p> <p>(1). <i>Nitrosomonas europaea</i>, <i>N. oligocarbogenes</i>.</p> <p>(2). <i>Nitrobacter agilis</i>, <i>N. widowgradski</i>.</p>	<p>(1). 2NH₄⁺ + O₂ → 2NH₂OH + 2H⁺.</p> <p>(2) NH₄⁺ + 1,5 O₂ → NO⁻ + 2H⁺ + H₂O + 275 kJ.</p>
<p>Denitrifikasi :</p> <p><i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Ps. fluorescens</i>, <i>Ps. denitrificans</i>, <i>Bacillus</i>, <i>Spirillum</i>, <i>Hyphomicrobium</i>, <i>Agrobacterium</i>, <i>Acinetobacter</i>, <i>Propionebacterium</i>, <i>Rhizobium</i>, <i>Corynebacterium</i>, <i>Cytophaga</i>, <i>Thiobacillus</i>, dan <i>Alcaligenes</i>.</p>	<p>NO₃ NO₂ NO NO₂ N₂.</p>

Transformasi

Beberapa senyawa kimia dilepaskan ke dalam badan-air mengalami transformasi dalam lingkungan dan dapat membuatnya lebih toksik. Sebagai contoh, merkuri, dalam bentuk merkuri anorganik (Hg²⁺) dikonversikan menjadi metil (CH₃Hg⁺) dan dimetil merkuri oleh aktivitas bakteri dan fungi dalam lingkungan akuatik.

Proses metilasi terjadi dalam keadaan anaerobik (misalnya oleh *Clostridium*) atau keadaan aerobik (misalnya oleh *Neurospora*, *Pseudomonas*). Metil merkuri bersifat toksik untuk beberapa hewan. Beberapa transformasi merkuri non-biologik juga terjadi, bergantung pada keadaan lingkungan. Pestisida juga mengalami transformasi, tetapi hanya sedikit. Sebagai contoh, aldrin dikonversikan menjadi dieldrin, dan DDT dikonversikan menjadi DDE (diklorodifeniletan), tetapi produk

tersebut bersifat sangat toksik. Hidrokarbon terklorinasi (termasuk PCBs), sangat besar jumlahnya dalam lingkungan dan tetap menjadi masalah terbesar dalam polusi lingkungan.

Toleransi

Populasi mengembangkan toleransi terhadap polutan yang membuatnya bertahan hidup dalam lingkungan yang penuh dengan polutan. Mereka mencapai toleransinya dengan menjalankan fungsi normalnya pada tingkat timbunan yang sangat toksik atau memetabolisme dan mendetosifikasi polutan.

Mekanisme toleransi terhadap polusi sangat kompleks, melibatkan beberapa sistem metabolik, dan spesies memecahkan masalah toleransi terhadap polutan tertentu dengan cara yang berbeda.

Batas toleransi organisme terhadap polutan dapat berlipat dua pada generasi berikutnya, misalnya isolat alge hijau non-toleran, *Scenedesmus* dan *Chlorella* dalam subkultur menjadi bertahan pada konsentrasi tinggi nikel dan tembaga, setelah delapan generasi. Paparan sebelumnya terhadap tingkat rendah polutan pada suatu organisme, selanjutnya dapat membuat organisme tersebut lebih toleran. Beattie dan Pascoe (1979) memperlihatkan pemberian kadmium terhadap telur ikan pelangi memeberikan perlindungan untuk menetas larva pada saat terpapar kadmium. Hasilnya menunjukkan bahwa pemberian logam dosis rendah (pretreatment) menstimulasi sintesis metalotionein.

Beberapa bakteri dapat cepat menjadi toleran terhadap polutan dan terjadi resistensi gen pada plasmid. Plasmid merupakan elemen genetik kecil yang terpisah dari kromosom yang dapat dipindahkan dari sel ke sel lain melalui konjugasi bakteri atau melalui transduksi (yang melibatkan virus penyerang bakteri). Bakteri resisten dapat meningkatkan transport polutan, khususnya logam, dalam lingkungan melalui mekanisme : solubilisasi, konsentrasi, dan konversi menjadi spesies organometalik dan bentuk elemen genetiknya, hal ini merupakan suatu bahaya lingkungan potensial. Bagaimanapun bakteri resisten dapat membuang logam berat dari lingkungan, dengan penggunaan teknik rekayasa genetika, strain bakteri dapat menghasilkan peran berarti dalam detoksifikasi limbah industri.

Akumulasi

Dalam hal ini sangat penting untuk membedakan antara biomagnifikasi dengan bioakumulasi. Dengan biomagnifikasi terjadi peningkatan membesarnya sejumlah polutan sepanjang rantai makanan, karnivor mengandung konsentrasi lebih besar dibandingkan herbivor (yang mengandung banyak tumbuhan). Bioakumulasi hanya memerlukan ambilan dari air dan tidak tergantung tingkat tropik. Pestisida organoklorin mengalami biomagnifikasi sepanjang rantai makanan, kecuali untuk logam (Mance, 1987). Bioakumulasi terjadi pada beberapa polutan toksik, konsentrasi yang sangat tinggi terdapat dalam organisme air tingkat yang sangat rendah. Faktor biokonsentrasi timah 300.000 dilaporkan terdapat dalam siput *Lymnaea palustris*.

Kecepatan akumulasi polutan bergantung pada faktor eksternal dan internal suatu organisme. Konsentrasi polutan dalam air adalah penting dan beberapa spesies menimbun banyak polutan ketika hidup dalam air berpolutan. Sebagai contoh, konsentrasi logam dalam alge dan bryofita secara signifikan berhubungan dengan konsentrasinya dalam air. Tetapi hubungan tersebut tidak tetap untuk tingkat logam lingkungan dengan konsentrasi logam dalam ikan dan invertebrata (Kelly, 1988, Barak dan Mason, 1989). Faktor lingkungan lain yang mempengaruhi kecepatan akumulasi adalah suhu dan salinitas. Sebagai contoh, biokonsentrasi merkuri dalam 'bluegill sunfish' meningkat secara eksponensial dengan suhu air dan konsentrasi kadmium dalam jaringan moluska berbanding terbalik dengan salinitas lingkungan (Frazier, 1979).

Asidifikasi

Sumber Asiditas (Keasaman). Hujan asam dan asidifikasi air bersih sudah dialami lebih dari 20 tahun, tetapi hal ini bukan masalah baru. Polutan utama yang dapat menyebabkan hujan asam adalah sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x). Setiap tahun, dikeluarkan sekitar 1,8 juta ton sulfur dan 0,6 juta ton nitrogen. Sekitar 60% SO_2 dihasilkan dari pembangkit tenaga listrik, dan 30% NO_x dihasilkan dari limbah industri, dan sejumlah limbah mulai dikurangi sejak tahun 1970 dengan memperbaiki perundang-undangan pengendalian polusi udara. Sebaliknya buangan

nitrogen terus-menerus meningkat, dengan jumlah 45% dihasilkan dari pembangkit tenaga listrik dan 30% dari alat pembuangan kendaraan (knalpot) (Mason, J., 1989).

Ketika SO_2 dan NO_x mencapai atmosfer, keduanya akan berreaksi dengan uap air dan mengalami oksidasi, menghasilkan formasi asam sulfat dan nitrat, terutama terdapat dalam awan dan jatuh ke tanah dalam hujan atau salju ('wet deposition'). Kecepatan perubahan sangat tinggi, sekitar 100% per jam pada musim panas dan 20% per jam pada musim dingin. Secara bergantian, dalam atmosfer kering, reaksi fotokimia kompleks yang melibatkan bahan pengoksidasi sangat reaktif, seperti ozon dihasilkan dalam produksi asam sulfat dan nitrat., Kecepatan perubahan menjadi sekitar 16% per hari pada musim panas dan 3% per hari pada musim dingin, lebih lambat dibandingkan dengan reaksi dalam udara lembab. Asam dari reaksi tersebut mencapai permukaan bumi dalam bentuk gas atau partikel ('dry deposition'). Produksi asam dari prekursor gas dibatasi oleh tersedianya bahan pengoksidasi, hidrokarbon dan radiasi ultraviolet dari matahari (Mason, 1989). Terdapat bukti bahwa seluruh atmosfer pada hemisfer bagian utara lebih reaktif dibandingkan dengan beberapa dekade sebelumnya dan hal ini mempercepat proses asidifikasi.

Air hujan yang tidak terkontaminasi, dalam keseimbangan dengan karbon dioksida atmosferik, memiliki pH 5,6. Hampi seluruh bagian dunia, pH hujan dan salju memiliki pH lebih rendah dari 5,6.

Pengaruh Asidifikasi Terhadap Dekomposer Akuatik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa air asam mempengaruhi kecepatan dekomposisi dan pada percobaan laboratorium, menggunakan daun 'birch' sebagai substrat, kecepatan konsumsi oksigen oleh mikroorganisme menjadi setengahnya ketika pH. 7 diturunkan menjadi 5,2. Di sini terjadi pergeseran dominansi dari bakteri ke fungi (Haines, 1981). Dalam sungai dengan pH 4,6-5,4 dekomposisi ditemukan menjadi antara 5-20 kali lebih lambat dibandingkan dalam sungai dengan pH 5,6-7,1 (Minshall dan Minshall, 1978). Umumnya, di sana terjadi penambahan bahan organik, seperti daun, dan ranting, yang dapat menyebabkan penurunan mineralisasi. Akibat penurunan keterbatasan nutrien seperti fosfor selanjutnya dapat menurunkan produksi primer.

E. PENGOLAHAN LIMBAH

1. Dasar Proses Pengolahan Limbah

Di dalam pengolahan limbah atau buangan, baik dalam substrat air ataupun tanah, harus dilakukan penelitian dan analisis terhadap bentuk, jenis, sifat, jumlah limbah dan habitat yang akan menerima limbah tersebut. Sehingga perencanaan pengolahan, dan pelaksanaannya akan memberikan hasil yang optimal sesuai yang diharapkan.

Tujuan pengolahan limbah diantaranya adalah :

- (1). Dari segi kesehatan : untuk menghindari penyakit menular melalui air, karena air merupakan medium yang baik untuk pertumbuhan mikroorganisme patogen, juga menguraikan senyawa kimia berbahaya menjadi senyawa yang tidak berbahaya;
- (2). Dari segi estetika : untuk melindungi air dari warna dan bau yang tidak menyenangkan dan tidak diharapkan, terutama untuk aliran sungai yang melewati perkotaan, dan perumahan penduduk;
- (3). Dari segi ekologi : untuk mengurangi kandungan organik limbah (misalnya, menurunkan BOD), termasuk membuang atau mengurangi bahan organik yang bersifat toksik dan karsinogenik, bermanfaat bagi kelangsungan hidup organisme dalam air (hewan maupun tanaman air), juga untuk menurunkan kandungan nutrien (N,P) dari permukaan air atau air-tanah jika cairan digunakan untuk pengolahan tanah/pertanian.

Secara garis besar terdapat empat tahap pengolahan air-limbah tetapi, tidak semua tahap dapat digunakan, bergantung pada kualitas efluen/ karakteristik bahan yang diterima, serta tujuan pengolahan, yaitu :

- (1). Pengolahan limbah pendahuluan : termasuk 'maceration' atau pemecahan bahan-bahan berukuran besar, 'screening' atau pemisahan dan pembuangan pasir bersama-sama dengan aliran angin yang kuat;
- (2). Pengolahan limbah primer : sedimentasi atau pengendapan padatan yang dipisahkan dalam bentuk lumpur;
- (3). Pengolahan limbah sekunder/secara biologik : bahan organik yang terlarut dan koloid dioksidasi dengan adanya mikroorganisme;

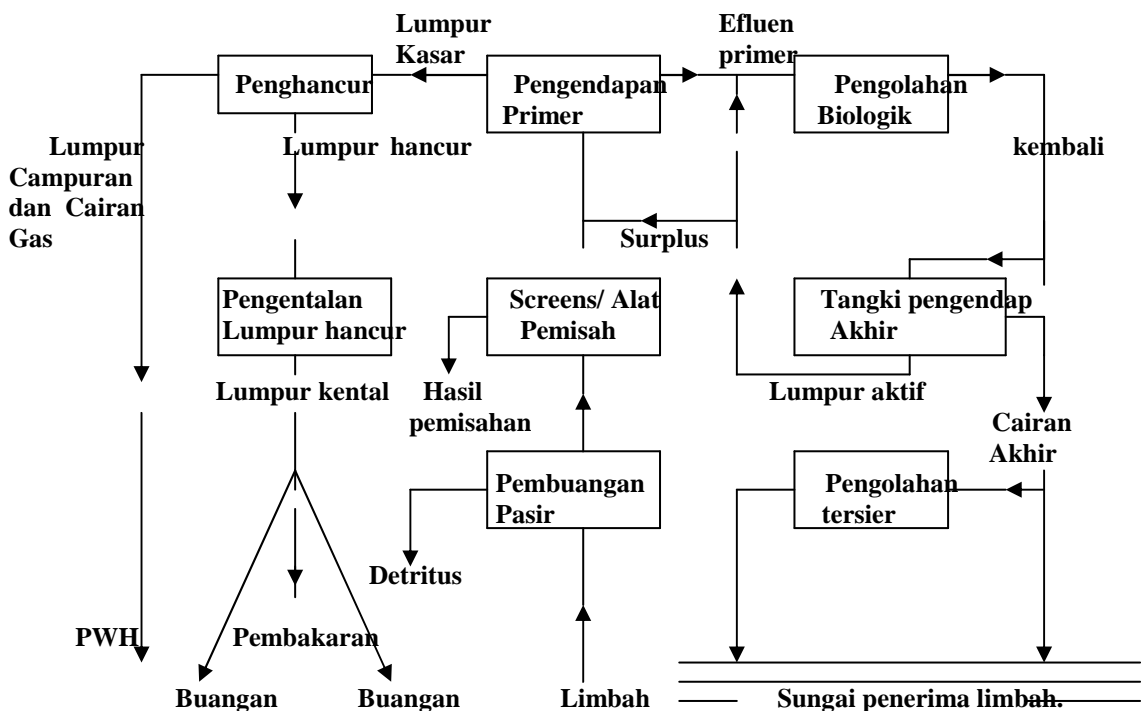
(4). Pengolahan limbah tersier : digunakan untuk cairan berkualitas sangat tinggi. Dalam hal ini, termasuk perubahan BOD, pembuangan bakteri, padatan , senyawa kimia toksik tertentu dan nutrisi.

Sebelum dilakukan pengolahan air-limbah, harus diketahui beberapa karakteristik air tersebut, yaitu :

- (1) Karakteristika fisik yang menjadi parameter pengolahan : suhu, total solid/padatan, warna, bau, dan kekeruhan;
- (2) Karakteristika kimia yang menjadi parameter pengolahan : senyawa organik, senyawa anorganik, dan gas;
- (3) Karakteristika biologik yang menjadi parameter pengolahan : kandungan mikroba, tumbuhan, dan hewan yang ada di dalamnya.

a. Pengolahan Limbah Pendahuluan

Pada awalnya limbah dilalukan melalui pemisah (deretan batang besi berukuran 75-100 cm), yang akan membuang benda-benda berukuran besar, misalnya kayu, kertas dan botol. Pemisahan dilaksanakan secara otomatis dan pemisahan ini termasuk pembakaran atau penghancuran dan dikembalikan lagi ke bagian awal pemisah. Pasir dan batu-batu kecil dilalukan melalui saluran dengan kecepatan yang konstan atau melalui saringan pasir.



Gambar 11.3 Diagram Unit Pengolahan Limbah.

Keterangan : PWH = Power House, sumber energi (api, generator listrik) untuk rumah-tangga

Detritus = partikel bahan organik (selulosa, hemiselulosa, khitin).

2. Pengolahan Limbah Primer

Proses pengolahan primer atau proses sedimentasi/pengendapan, dengan cara melalukan limbah secara perlahan-lahan dan terus-menerus melalui tangki-tangki, untuk membuang bahan padat yang dapat diendapkan. Selanjutnya lumpur kasar dapat dimasukkan ke dalam tangki '*sluge digestion*', cairan supernatan (cairan utama atau limbah yang terendapkan) akan dialirkan ke tempat pengolahan berikutnya. Terdapat berbagai rancangan tangki pengendapan tetapi yang sering digunakan adalah dangkal, desain radial (dengan jari-jari lingkaran), dilengkapi dengan roda gigi/persneling mekanik untuk membuang lumpur. Selanjutnya limbah dibiarkan selama beberapa jam dan sekitar 50% padatan terendapkan sebagai lumpur primer. Sedimentasi lebih murah dibandingkan pengolahan secara biologik dalam hal unit pembuangan polusi.

3. Pengolahan Limbah Sekunder/Secara Biologi

Pengolahan sekunder melibatkan oksidasi senyawa organik berbentuk koloid dan terlarut dengan adanya mikroorganisme dan organisme dekomposer lain. Keadaan berangin biasanya dibutuhkan oleh '*trickling filters*' atau '*activated sludge tanks*' (lumpur aktif), sedangkan dalam iklim yang hangat dapat digunakan '*oxidation ponds*' (kolam oksidasi). Lumpur sekunder yang dihasilkan dari pengolahan secara biologik dicampurkan dengan lumpur primer dalam tangki '*sluge digestion*', dimana terjadi penguraian secara anaerobik oleh mikroorganisme.

Terdapat keuntungan dan kerugian dalam metode pengolahan secara biologi. Filter umumnya digunakan dalam mengolah limbah yang sedikit, menyediakan populasi kurang dari 50.000. Sistem ini cenderung membutuhkan biaya tinggi, tetapi lebih murah jika dibandingkan dengan lumpur aktif.

Trickling (percolating) filters. Gambar 11.4. Memperlihatkan suatu irisan melintang bentuk trickling filter. Trickling filters merupakan tangki berbentuk lingkaran atau empat-persegi panjang, setinggi 1-3 m dan diisi dengan susunan alas (*filter bed*) mineral atau plastik. Mineral dapat berupa pecahan batu, genting, arang, dan 'slag' (terak, ampas bijih), tetapi harus berukuran serupa, jadi akan menempati bagian yang sama. Rentang ukuran biasanya antara 3,5-5,0 cm, dengan bagian permukaan khusus bervolume $80-110 \text{ m}^2/\text{m}^3$ dan ukuran jarak 45-55 % dari volume keseluruhan. Dilengkapi dengan batang pemutar (bagian tengah) atau pipa yang dapat digerakan maju-mundur, pada tangki persegi. Bagian atas terdapat lubang untuk masukan limbah, dan bagian bawah arah berhadapan disediakan kran untuk mengeluarkan efluen/cairan.

Faktor lain yang mempengaruhi kecepatan perubahan BOD adalah daerah permukaan medium filtrasi, tekanan hidraulik, dan temperatur limbah.

Bakteri yang terdapat dalam jumlah paling besar dan bentuk dasar dari jaring makanan. Tercatat banyak bakteri yang terlibat, tetapi yang dominan adalah batang Gram-negatif aerobik *Zooglea*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, dan *Flavobacterium*.

Fungi secara normal berjumlah 8:1 dengan bakteri, dan terdapat pada bagian atas filter dan jumlahnya berlimpah sekitar kedalaman 15 cm. Genera yang sering mendominasi adalah *Sepedonium*, *Subbaromyces*, *Ascoidea*, *Fusarium*, *Geotrichium*, dan *Trichosporon*. Bakteri dan fungi heterotrofik tersebut melaksanakan oksidasi primer efluen. Bakteri autotrofik cenderung lebih banyak pada lapisan bawah filter, *Nitrosomonas* mengoksidasi amonium menjadi nitrit, dan *Nitrobacter* mengoksidasi nitrit menjadi nitrat.

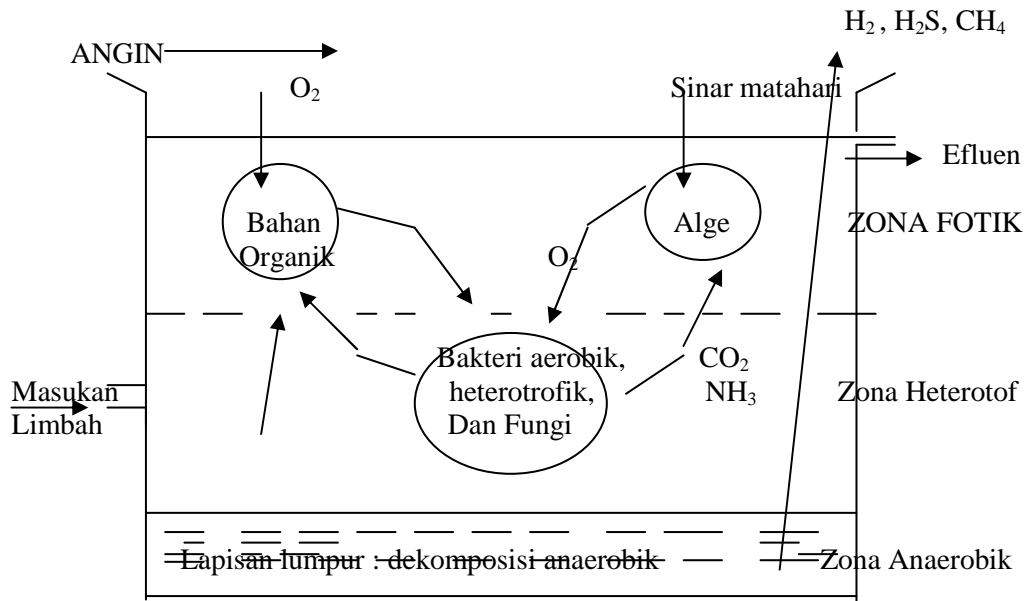
Alga sering ditemukan dalam *percolating filter* (misalnya, *Chlorella*, *Oscillatoria*, *Ulothrix*), tetapi peranannya kecil dalam proses pemurnian.

Protozoa terdapat sebanyak fungi dan dapat diidentifikasi sekitar 218 spesies, 116 diantaranya siliata (siliata yang banyak ditemukan : *Carchesium*, *Chilodonella*, dan *Colpoda*). Peran utama protozoa adalah untuk membuang bakteri, sehingga efluen dapat dibersihkan.

Proses *Activated sludge*. Dalam tangki *activated sludge* (lumpur aktif), limbah endapan dicampurkan dengan suspensi mikroorganisme dan diberi udara selama 1-30 jam, bergantung pada tujuan pengolahan. Medium diperkaya dengan larutan dan suspensi nutrisi, ditambah oksigen dan diaduk dengan cepat. Bahan yang tersuspensi dan koloid mengadsorpsi gumpalan mikroorganisme. Selanjutnya mikroorganisme memecahkan gumpalan dan melarutkan nutrisi, proses ini dikenal sebagai stabilisasi. Lumpur, yang meningkat sebanyak 5-10% selama proses, dipindah dari cairan dalam tangki pengendapan, dan dikembalikan lagi ke tangki aerasi.

Lumpur aktif digambarkan sebagai lingkungan akuatik yang sebenarnya. Kondisi turbulen dalam tangki tidak layak untuk makroinvertebrata, sehingga komunitas tanpa mata-rantai yang lebih besar dalam jaring makanan. Sejumlah massa mikroorganisme dalam sistem ini dikendalikan oleh pengambilan kelebihan lumpur, sedangkan lapisan berlebihan pada filter dibuang dengan perantara proses biologi. Dalam tangki lumpur aktif, komunitas mikroorganisme awalnya dihubungkan dengan limbah yang tidak diolah, selanjutnya, memurnikan efluen, sedangkan pada *filter bed* suatu suksesi komunitas timbul pada kedalaman yang berbeda dan dihubungkan dengan perbedaan derajat pemurnian efluen.

Oxidation ponds. “*Oxidation ponds*” atau kolam oksidasi (stabilisasi) digunakan dalam iklim hangat untuk memurnikan limbah dan prosesnya melibatkan interaksi antara bakteri dan alga. (Gambar 11-4.) Kolam merupakan danau di pinggir laut yang dangkal, dengan kedalaman 1m. Endapan lumpur dialirkan melalui kolam selama 2-3 minggu, tetapi lumpur kasar dapat disimpan lebih dari 6 bulan. Bakteri dalam kolam menghancurkan bahan organik yang biodegradable untuk melepaskan CO₂, amonia, dan nitrat. Produk ini digunakan oleh alga, bersama-sama dengan sinar matahari, dan proses fotosintetik melepaskan oksigen, memungkinkan bakteri menguraikan limbah lebih banyak. Suatu lapisan endapan lumpur organik pada dasar kolam dan dekomposisi anaerobik menyebabkan pelepasan metana.



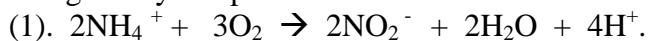
Gambar 11.4 Proses dalam kolam oksidasi.

d. Pengolahan Limbah Tersier

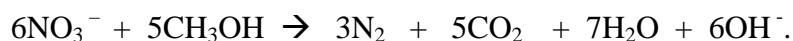
Berbagai pengenceran efluen yang tersedia, dalam air yang menerimanya tidak cukup untuk mencegah terjadinya deteriorasi kualitas air. Untuk mencegahnya harus dihasilkan efluen berkualitas tinggi dan perbaikan efluen ini dikenal sebagai pengolahan tersier. Pembuangan fosfat dan nitrat juga penting untuk lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Nitrogen biasanya dibuang dari air limbah melalui proses biologik, melibatkan nitrifikasi, dan denitrifikasi. Ketika diolah dengan pengolahan sekunder, pembuangan nitrogen dapat dicapai lebih dari 90% dari nitrogen total. Nitrifikasi melibatkan bakteri *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*.

Nitrifikasi merupakan reaksi oksidasi amonia menjadi nitrit dengan nitrat sebagai senyawa perantara :



Denitrifikasi merupakan perubahan nitrat menjadi gas nitrogen dan sejumlah bakteri heterotrofik fakultatif menggunakan nitrat, juga oksigen sebagai akseptor elektron akhir selama pemecahan bahan organik dalam kondisi anoksik, dengan metanol sebagai sumber karbon, dalam reaksi :



Sebagai pembanding, sistem *fluidized bed* merupakan cara baru untuk mengolah limbah dan menghasilkan kualitas tinggi dan juga efisien untuk membuang nitrat. Sistem *Fluidized bed* merupakan gambaran gabungan trickling filter dan proses lumpur aktif.

Pembuangan Patogen. Penurunan sejumlah patogen selama pengolahan limbah dipengaruhi lama waktu yang digunakan selama pengolahan, komposisi senyawa kimia limbah dan lingkungan degradasinya, kekuatan antagonistik pada flora biologik, pH dan suhu pelaksanaan, bersama-sama dengan berbagai faktor yang tidak diketahui. Trickling filter dapat mengurangi kerapatan *Salmonella paratyphi* sampai sekitar 84-99%, virus enterik sampai sekitar 40-60% dan kista *Entamoeba histolytica* sampai sekitar 88-99%, sedangkan kolam stabilisasi/oksidasi lebih banyak membuang patogen. Selanjutnya pengenceran limbah yang diterima sumber air dianggap sebagai cara yang efisien untuk menurunkan insidensi patogen. Masalah potensial terbesar dihubungkan dengan *septic tanks* rumah, yang sering meluap dan tidak dikelola secara efisien.

F. BIOREMEDIASI

Biodegradabilitas (penguraian secara biologik/mikrobiologik) suatu senyawa bergantung pada sifat dan susunan bahan atau senyawa yang diurai, umumnya senyawa organik mempunyai sifat yang tinggi (cepat) sedangkan senyawa anorganik mempunyai sifat yang rendah (lambat atau sangat lambat). Tetapi dalam kenyataannya, khususnya di lingkungan alami, biodegradabilitas ditentukan oleh beberapa faktor, baik faktor biotik (bentuk dan sifat organisme pengurai) dan faktor abiotik (bentuk, kadar air, suhu, sumber energi, sumber nutrisi, pH bahan yang akan diurai).

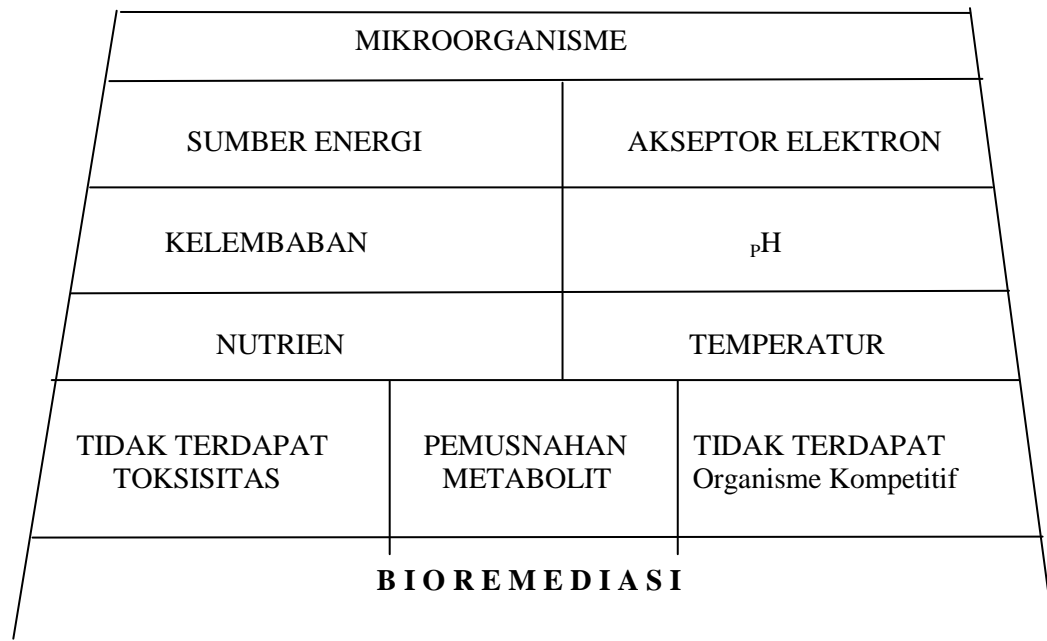
Limbah domestik (umumnya banyak mengandung bahan organik), dan limbah non-domestik (umumnya banyak mengandung bahan anorganik) memiliki kandungan senyawa yang berbeda, serta perbedaan biodegradabilitas. Oleh karena itu dengan menggunakan teknologi dapat dilakukan proses penguraian limbah secara mikrobiologik, dalam hal ini memerlukan penelitian pendahuluan mengenai berbagai

sifat kimia-fisik-biologik limbah, mikroorganisme-pengurai, serta lingkungan penerima limbah tersebut.

Sejumlah senyawa kimia berbahaya (kontaminan/pencemar) dan kelompok bahan-buangan sudah diperbaiki melalui bioremediasi. Bioremediasi merupakan proses perbaikan bahan buangan atau limbah dengan melibatkan mikroorganisme. Terdapatnya senyawa berbahaya dalam lingkungan karena, kondisi lingkungan tersebut tidak memungkinkan aktivitas mikroba untuk melakukan degradasi secara biokimia. Optimalisasi kondisi lingkungan tersebut melalui pemahaman prinsip biologik mengenai senyawa yang akan diurai, dan pengaruh kondisi lingkungan terhadap kemampuan mikroorganisme dan reaksi katalisisnya.

Teknik pertama yang digunakan adalah mengevaluasi, menentukan batas kondisi lingkungan pada daerah yang tercemar bahan tertentu. Rancangan akhir harus menyediakan kontrol untuk memanipulasi keadaan lingkungan tersebut dalam rangka meningkatkan biodegradasi senyawa target. Senyawa target merupakan senyawa kimia berbahaya yang akan diremediasi melalui bioremediasi.

Bioremediasi merupakan aplikasi prinsip proses biologik/biodegradasi, untuk menangani air tanah, tanah, dan lumpur yang tercemar oleh senyawa kimia berbahaya. Terdapat sedikit perbedaan antara rancangan prinsip proses biologik/biodegradasi air limbah dengan bioremediasi senyawa kimia berbahaya. Proses biologik merupakan proses katalisis senyawa kimia oleh mikroorganisme yang terjadi secara alami. Pada bioremediasi menggunakan teknik kimia dan teknik lingkungan. Bioremediasi lebih rumit karena menggunakan katalis (enzim) yang disuplai oleh mikroorganisme yang mengkatalisis penghancuran senyawa berbahaya spesifik (senyawa target). Senyawa kimia berbahaya dapat berupa substrat atau bukan substrat bagi mikroorganisme. Reaksi katalisis senyawa kimia ini dilaksanakan dalam unit modular ("sel") atau di luar sel. Prinsip reaksinya adalah reaksi reduksi-oksidasi, yang penting untuk pembentukan energi bagi organisme.



Gambar 11.5 Faktor-faktor yang dibutuhkan dalam bioremediasi.

Untuk keberhasilan bioremediasi, proses harus dikontrol dengan tersedianya sumber energi, sistem donor-akseptor elektron, dan nutrien. Pengetahuan mengenai mekanik, kinetik, dan interaksi mikroorganisme untuk transformasi senyawa kimia berbahaya telah berkembang dan akan terus dibuat perbaikan dalam rancangan dan pelaksanaan remediasi secara biologi tersebut.

Sumber Energi Mikroorganisme. Penguraian/degradasi senyawa kimia berbahaya secara biologi berdasarkan pada prinsip yang mendukung seluruh ekosistem. Prinsip-prinsip ini melibatkan sirkulasi, transformasi, dan akumulasi energi dan materi. Pelaksanaan bioremediasi membutuhkan pemahaman mengenai hubungan timbal-balik dari fungsi-fungsi mikroorganisme tersebut. Rancangan suatu proses bioremediasi melibatkan optimalisasi dan pengendalian bagian tertentu dari siklus biokimia. Transformasi energi dan materi, secara biokimia membutuhkan katalis. Mikroorganisme merupakan generator katalis, dan enzim merupakan katalis. Enzim ini dihasilkan dalam reaksi katabolik (degradatif) untuk menyediakan energi dan materi untuk sintesis dan pertumbuhan sel mikroorganisme.

Proses optimalisasi untuk degradasi senyawa kimia berbahaya membutuhkan suatu pemahaman mengenai mikroorganisme yang terlibat, kebutuhan nutriennya, reaksi biokimia yang diperantainya, dan alasan mikroorganisme mendukung reaksi tersebut. Poin terakhir merupakan dasar pengaturan kekuatan seluruh reaksi biologi: Mikroorganisme harus memperoleh energi. Reaksi spesifik dimana organisme memperoleh energi ini ditentukan oleh sejumlah energi yang dihasilkan. Selanjutnya termodinamika dapat digunakan untuk memperkirakan reaksi biokimia spesifik tersebut. Mekanisme organisme untuk memperoleh energi merupakan dasar untuk membedakan subdivisi kelompok utamanya, pengelompokan ini berdasarkan kemampuan metabolismenya, yaitu berdasarkan sumber energi sumber karbon, dan donor dan akseptor elektron yang diperantarai reaksi reduksi-oksidasi.

Kelompok pertama: berdasarkan sumber energi yang mendukung biosintesis dan pertumbuhan. **Fototrof** : menggunakan sumber energi pertama yaitu sinar matahari secara langsung. **Kemotrof**: menggunakan sumber energi kedua berupa energi kimia.

Kelompok kedua : berdasarkan sumber karbon yang digunakan, mengabaikan kebutuhan untuk faktor pertumbuhan spesifik. Autotrof : menggunakan CO₂ sebagai sumber karbon. Heterotrof : menggunakan senyawa organik sebagai sumber karbon.

Kelompok ketiga: berdasarkan sumber elektron yang digunakan mikroorganisme untuk reaksi reduksi-oksidasi. *Organotrof* : donor elektron dari senyawa organik. *Lithotrof* : sumber elektron dari senyawa anorganik.

G. MIKROORGANISME PENGHANCUR SENYAWA KIMIA BERBAHAYA

1. Transformasi Senyawa Kimia Berbahaya.

Transformasi senyawa organik oleh mikroba sering digambarkan sebagai detoksifikasi, degradasi, dan mineralisasi. **Detoksifikasi** : transformasi/perubahan senyawa menjadi beberapa bentuk perantara yang bersifat kurang toksik. **Degradasi** memiliki arti : senyawa asal tidak terdapat lagi. **Mineralisasi** : konversi struktur organik sempurna menjadi bentuk anaorganik. Akibatnya detoksifikasi dan degradasi penting untuk mineralisasi.

Beberapa senyawa yang secara nyata menimbulkan masalah terhadap lingkungan, termasuk di dalamnya yaitu pestisida, PCBs, hidrokarbon alifatik dan alisiklik (terdapat dalam minyak bumi dan pestisida), dan zat pewarna. Untuk sebagian besar senyawa kimia, kontak langsung antara permukaan sel mikroba dengan hidrokarbon bersifat penting untuk kecepatan degradasi tinggi. Bakteri dan fungi berfilamen sering menyerang senyawa alkana.

Tabel 11.15 Bakteri dan Yeast pengoksidasi hidrokarbon alifatik

	Bakteri	Yeast
	<i>Achromobacter</i>	<i>Candida</i>
<i>Acinetobacter sp.</i>	<i>Cryptococcus</i>	
<i>Actinomyces</i>	<i>Debaryomyces</i>	
<i>Aeromonas</i>	<i>Endomyces</i>	
<i>Alcaligenes</i>	<i>Hansenula</i>	
	ARTHROBACTER	MYCOTORULA
<i>Bacillus</i>	<i>Pichia</i>	
<i>Beneckea</i>	<i>Rhodotorula</i>	
<i>Brevibacterium</i>	<i>Saccharomyces</i>	
<i>Corynebacterium</i>	<i>Selenotila</i>	
<i>Flavobacterium</i>	<i>Sporidiobolus</i>	
<i>Methylobacter*</i>	<i>Sporobolomyces</i>	
<i>Methylobacterium*</i>	<i>Torulopsis</i>	
<i>Methylococcus*</i>	<i>Trichosporon</i>	
<i>Methylomonas*</i>		
<i>Methylosinus*</i>		
<i>Micromonospora</i>		
<i>Mycobacterium</i>		
<i>Nocardia</i>		

Pseudomonas
Spirillum
Vibrio

* Methan merupakan hidrokarbon yang digunakan sebagai sumber karbon tunggal.

2. Konsorsium Mikroorganisme

Dunia ditempati oleh keragaman mikroorganisme dan keragaman sumber energi yang digunakannya. Keragaman ini membuatnya dapat memecah ribuan senyawa kimia organik yang berbeda. Oleh karena itu, tidak mungkin hanya satu atau dua mikroorganisme spesifik yang menyebabkan keberhasilan bioremediasi. Mikroorganisme melakukan reaksi reduksi oksidasi dalam berbagai mekanisme terspesialisasi seringkali dalam bentuk kelompok. Kenyataannya dibutuhkan keragaman mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa organik kompleks atau untuk bioremediasi suatu tempat terkontaminasi dengan senyawa organik campuran.

Mikroorganime secara tersendiri tidak dapat melakukan mineralisasi sebagian besar senyawa berbahaya. Mineralisasi sempurna dihasilkan oleh campuran mikroorganisme. Tahap degradasi terjadi ketika organisme kedua mendegradasi produk metabolik pertama, kedua, ketiga dan seterusnya untuk menghasilkan mineralisasi sempurna suatu senyawa organik.

Tabel 11.16 Peran sinergisme mikroorganisme.

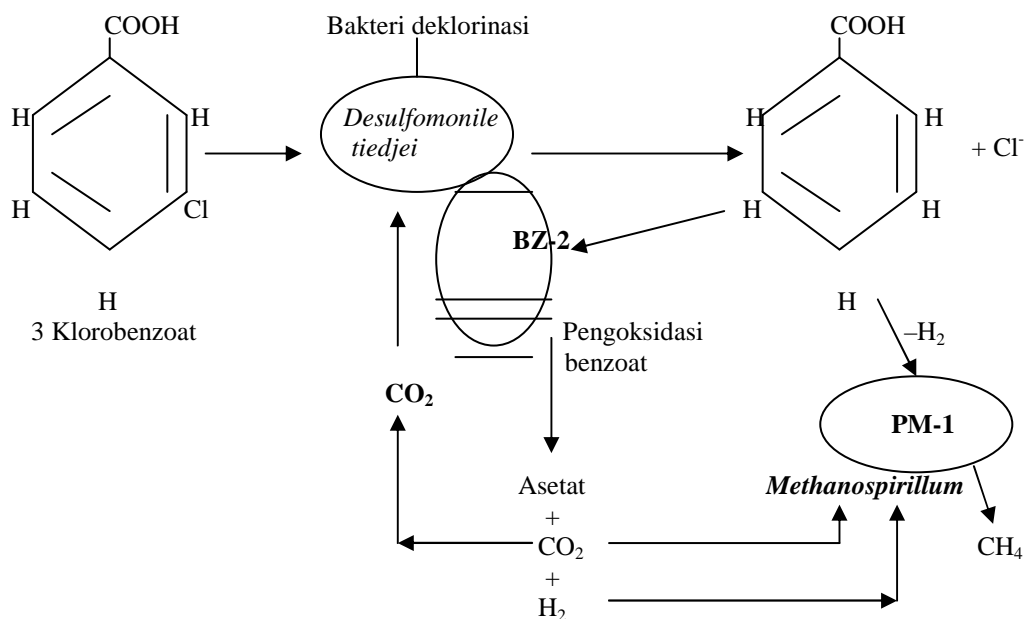
Tahap-tahap degradasi
Sintesis komponen penting
Pemusnahan metabolit toksik
Meningkatkan keseluruhan degradasi
Microbial web (jaringan mikroba), memerlukan hubungan yang kompleks
Termodinamika yang menguntungkan.

Interaksi mikroorganisme konsorsium, contohnya (Gambar 11-6), dengan tahap-tahap sebagai berikut:

1. *Desulfomonile tiedjei* merupakan organisme yang mampu menghilangkan klor pada klobenzoat. Karbon dioksida merupakan sumber karbon utama untuk organisme ini.

2. BZ-2 merupakan strain yang mampu mengoksidasi klorobenzoat, tetapi reaksi katalisis tidak berlangsung karena suatu situasi termodinamika yang tidak menguntungkan. Benzoat merupakan substrat yang membantu pertumbuhannya.
3. Strain PM-1 (*Methanospirillum*) hanya menggunakan format atau hidrogen sebagai substrat. Dengan menurunkan tekanan parsial gas hidrogen, organisme ini dapat membuat situasi yang menguntungkan secara termodinamik untuk strain BZ-2 sehingga dapat mengoksidasi benzoat. Konsorsium tiga mikroorganisme tersebut akan mendegradasi 3-klorobenzoat, menghasilkan metan, asetat, dan klorida.

Komunitas mikroba campuran adalah penting untuk bioremediasi kontaminan organik campuran, merupakan metode yang sering digunakan untuk mineralisasi senyawa berbahaya spesifik. Kemungkinan keberhasilan bioremediasi secara dramatik ditingkatkan dengan keragaman mikroba.



Gambar 11.6 Mikroorganisme konsorsium : Jaringan mikroba untuk degradasi senyawa kimia aromatik terklorinasi.

Tabel 11.17 Mikroorganisme yang aktif dalam tanah tercemar dan/atau pemulihan air-tanah.

<i>Achromobacter xyloxidans</i>	<i>Nitrosomonas eurupaca</i>
<i>Acinetobacter sp.</i>	<i>Nocardia coralina</i>
<i>Alcaligenes denitrificans</i>	<i>Phaerochete laevis</i>
<i>Birijerinckia sp.</i>	<i>Phaerochete chrysothrix</i>
<i>Desulfomonile tiedjei</i>	<i>Phaerochete filamentosa</i>
<i>Flavobacterium</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
<i>Hyphomicrobium sp.</i>	<i>Pseudomonas sp.</i>
<i>Inonotus circinatus</i>	<i>Pseudomonas stutzeri</i>
<i>Methanosarcina mazei</i>	<i>Pseudomonas vesicularis</i>
<i>Methanosarcina sp.</i>	<i>Pseudomonas mendonca</i>
<i>Methanobacteriaceae</i>	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>
<i>Mycobacterium sp.</i>	<i>Serratia marcescens</i>
<i>Mycobacterium vaccae</i>	<i>Trametes hirsuta</i>
<i>Xanthobacter autotrophicus</i>	

Sumber: Rainwater, 1991; Lamar, 1990 (dalam Cookson, 1995).

3. Dominasi Mikroorganisme.

Seperti telah dibahas di atas, bahwa tidak hanya satu spesies yang mampu melakukan bioremediasi suatu daerah yang tercemar. Senyawa berbahaya menyebabkan seleksi populasi mikroba campuran dengan memperbaiki kemampuannya untuk bertahan dan mengambil energi dari kontaminan.

Tabel 11.18 Mikroorganisme bioremediasi sebagai anggota konsorsium aktif

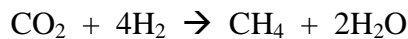
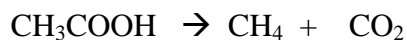
Identifikasi dalam tanah dan sistem air-tanah.	
<i>Alcaligenes denitrificans</i>	<i>Nocardia sp.</i>
<i>Arthrobacter globiformis</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
<i>Arthrobacter sp.</i>	<i>Pseudomonas cepacia</i>
<i>Bacillus megaterium</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
<i>Bacillus sp.</i>	<i>Pseudomonas glatheri</i>
<i>Birijerinckia sp.</i>	<i>Pseudomonas mendocina</i>
<i>Flavobacterium sp.</i>	<i>Pseudomonas methanic</i>
<i>Methanobacteriaceae*</i>	<i>Pseudomonas paucimobilis</i>
<i>Mycobacterium sp.</i>	<i>Pseudomonas putida</i>
<i>Mycobacterium vaccae</i>	<i>Pseudomonas sp.</i>
<i>Nitrosomonas eurupaca</i>	<i>Pseudomonas testosteroni</i>
<i>Nocardia corallina</i>	<i>Pseudomonas vesicularis</i>
<i>Nocardia erythropolis</i>	

Keterangan : *Genera yang tidak teridentifikasi pada pelaksanaan di lapangan.

4. Metanogen

Kelompok bakteri yang dikenal sebagai metanogen sangat berarti dalam bioremediasi karena hubungan ekologisnya dengan konsorsium bioremediasi. Degradasi produk fermentasi sering dirubah dengan adanya methanogens. Mikroorganisme ini membuat reaksi tertentu sehingga memungkinkan tersedianya lingkungan termodinamik yang lebih baik. Beberapa senyawa tidak mengalami deklorinasi kecuali jika terdapat aktivitas metanogen.

Bakteri penghasil metan menggunakan hidrogen sebagai sumber energi dan CO₂ sebagai akseptor elektron. Bakteri ini merupakan anaerob obligat dan mampu menghasilkan metan dalam biosfer. Senyawa organik seperti asam asetat, asam format, dan asam butirat menstimulasi pertumbuhannya. Asetat dan format dapat digunakan sebagai sumber karbon. Produksi metan oleh methanogen melalui reaksi sebagai berikut:



5. Metanotrof

Metanotrof, seperti metanogen, merupakan mikroorganisme spesifik untuk bioremediasi. Mikroorganisme ini, di bawah kondisi aerobik, mampu melakukan dehalogenasi senyawa berbahaya, mulai dari metan, etan, dan etilen-berhalogen. Bakteri ini disebut metanotrof karena menggunakan metan sebagai sumber karbon dan energi. Metanotrof merupakan bakteri prokariotik, yang bersifat aerob obligat dan terdapat dalam bentuk batang, vibrio, dan kokus. Dapat tumbuh cepat dalam keadaan berkurangnya tekanan oksigen, dan terdapat bukti bahwa alkohol dan H₂O₂ dapat menghambat aktivitas methanotrophs. Sebagian besar metanotrof merupakan metilotrof obligat, hanya menggunakan ikatan karbon--karbon sebagai sumber energi dan karbon. Beberapa anggotanya dapat menggunakan metanol dan formaldehid, dan ada juga yang menggunakan berbagai senyawa organik. Metilotrof fakultatif dapat tumbuh pada senyawa satu-karbon dan banyak-karbon. Sebagian besar

menggunakan amonia dan nitrat sebagai sumber nitrogen. Bakteri ini dapat dihambat pertumbuhannya dengan beberapa asam amino. Bakteri metilotrof mampu mengoksidasi berbagai senyawa, karena tidak memiliki spesifisitas enzim, monooksigenase.

RANGKUMAN

Berbagai mikroorganisme dapat tumbuh dalam suatu habitat yang beragam, seperti di air, tanah, udara dan dalam tubuh organisme. Lingkungan sebagai habitat mikroorganisme tersebut memberikan dukungan terhadap pertumbuhan dan keragaman mikroorganisme. Faktor-faktor lingkungan baik faktor abiotik dan biotik saling berinteraksi pada pertumbuhan dan penyebaran mikroorganisme.

Peranan mikroorganisme dalam lingkungan dapat memberikan keuntungan bagi organisme lain dan ada yang merugikan organisme lain. Beberapa keuntungan adanya mikroorganisme dalam lingkungan adalah berperan dalam perputaran/siklus materi dan energi terutama dalam siklus biogeokimia dan berperan sebagai decomposer (pengurai).

Mikroorganisme pada lingkungan alami dapat menjadi indikator baik buruknya kualitas lingkungan, baik lingkungan perairan, ataupun tersentrial. Lingkungan yang sudah terkontaminasi oleh mikroorganisme menunjukkan gejala penurunan kualitas lingkungan tersebut dan berpengaruh terhadap organisme lain, termasuk pada manusia.

Penggunaan mikroorganisme yang secara alami dalam suatu lingkungan bertindak sebagai pengurai, berperan penting dalam proses daur ulang dan biodegradasi limbah dan dalam proses bioremediasi lingkungan.

PERTANYAAN DAN TUGAS.

1. Jelaskan peranan mikroorganisme dalam lingkungan ?
2. Bagaimana proses bioremediasi dengan menggunakan mikroorganisme ?
3. Jelaskan bagaimanakah peranan mikroorganisme dalam proses “microbial leaching” !
4. Jelaskan aspek mikrobiologis:
 - a. lingkungan akuatik

b. lingkungan terestrial

5. Jelaskan pengolahan limbah secara mikrobiologi dengan:

- a. Lumpur aktif
- b. Triklng filter
- c. Kolam oksidasi

ISTILAH PENTING

- bioremediasi
- kualitas biologik
- uji fekal
- Coli fekal
- Transformasi
- Detoksifikasi
- Mineralisasi
- Lumpur aktif
- Kolam oksidasi
- Triklng filter
- Metanogen
- Metanotrof
- Konsorsium mikroorganisme