

Karakteristik dan Mikroorganisme Pengurai Limbah Industri Pangan

Prof. Dr. Ir. Betty Sri Laksmi Jenie, MS.



PENDAHULUAN

Dalam modul ini akan dibahas mengenai karakteristik limbah dari berbagai industri secara umum termasuk pertanian dan pangan serta jenis-jenis mikroorganisme yang dapat menguraikan limbah industri pangan serta teknik penanganan limbah industri pangan secara umum. Pokok bahasan ini penting dikuasai sebagai dasar untuk memilih teknik penanganan limbah industri pangan yang sesuai dan efektif serta menghasilkan air limbah industri pangan yang memenuhi baku mutu lingkungan yang dipersyaratkan oleh pemerintah, sehingga tidak mencemari lingkungan.

Pembahasan dalam modul ini meliputi:

1. sifat-sifat fisik limbah industri dan pertanian (sifat fisik, kimia dan biologis);
2. sifat-sifat kimia limbah industri dan pertanian;
3. sifat-sifat biologis limbah industri dan pertanian;
4. karakteristik limbah industri buah dan sayuran;
5. karakteristik limbah industri daging sapi dan unggas;
6. karakteristik limbah industri susu; dan hasil laut.

Dengan memahami materi di dalam modul ini, maka memungkinkan Anda untuk dapat mengetahui karakteristik atau sifat fisiko-kimia dari berbagai limbah industri, pertanian dan pangan baik pangan hewani maupun nabati, dan peranan berbagai jenis mikroorganisme pengurai limbah serta kaitannya dengan berbagai teknik penanganan limbah industri pangan secara umum.

Setelah selesai mempelajari modul ini, diharapkan secara umum Anda akan dapat mengetahui teknik penanganan limbah yang sesuai dan efektif untuk limbah industri pangan tertentu.

Kegiatan Belajar 1

Karakteristik Limbah Industri

Pemahaman mengenai sifat air limbah sangat penting dalam merancang dan mengoperasikan pengumpulan, perlakuan, dan fasilitas pembuangan serta dalam manajemen keteknikan dari kualitas lingkungan. Karakteristik air limbah meliputi sifat-sifat fisik, kimia dan biologis. Berbagai kontaminan penting yang terkandung dalam air limbah industri dan pertanian meliputi padatan tersuspensi, bahan organik yang dapat dihancurkan secara biologis (*biodegradable*), mikroorganisme patogen, bahan makanan untuk mikroorganisme sebagai nutrien, polutan utama, bahan organik refraktori, logam-logam berat, dan bahan organik terlarut perlu diperhatikan dalam penanganan air limbah. Jenis-jenis kontaminan dan penjelasan mengenai kepentingannya dapat dilihat pada Tabel 1.1.

A. KARAKTERISTIK LIMBAH INDUSTRI DAN PERTANIAN

1. Sifat Fisik

Sifat-sifat fisik air limbah yang paling penting adalah kadar total padatan, yang terdiri dari bahan-bahan yang terapung, bahan-bahan yang terendapkan, bahan koloid, dan bahan dalam larutan. Sifat-sifat fisik penting lainnya termasuk bau, suhu, densitas, warna, dan kekeruhan.

Fraksi padatan yang dapat disaring terdiri dari padatan koloid dan terlarut. Fraksi koloid tidak dapat dipisahkan dengan pengendapan. Umumnya, fraksi koloid diperlakukan dengan oksidasi secara biologis atau koagulasi, dilanjutkan dengan sedimentasi untuk menghilangkan partikel-partikel tersebut dari suspensi.

Bau dalam air limbah biasanya disebabkan oleh gas-gas yang dihasilkan akibat pemecahan (dekomposisi) bahan organik atau oleh bahan-bahan yang ditambahkan ke dalam air limbah. Air limbah segar mempunyai bau tertentu yang kurang diterima, apalagi bau air limbah yang telah melangsungkan pemecahan secara anaerobik (tanpa oksigen), lebih ditolak. Bau khas dari air limbah yang sudah busuk atau septik adalah berasal dari hidrogen sulfida, yang diproduksi oleh mikroorganisme yang mereduksi sulfat menjadi sulfida. Air limbah industri dapat mengandung senyawa-senyawa bau atau senyawa-senyawa yang menghasilkan bau selama proses penanganan air limbah.

Senyawa-senyawa bau yang terkait dengan air limbah yang tidak diberi perlakuan dapat dilihat pada Tabel 1.2.

Tabel 1.1.
Berbagai kontaminan penting yang perlu diperhatikan dalam penanganan air limbah

Jenis Kontaminan	Kepentingan
Padatan tersuspensi	Padatan tersuspensi dapat menyebabkan terbentuknya deposit lumpur dan kondisi anaerobik bila air limbah yang tidak diberi perlakuan dibuang ke lingkungan akuatik.
Bahan organik yang dapat dihancurkan secara biologis	Terutama terdiri dari protein, karbohidrat, dan lemak. Bahan-bahan organik diukur dengan BOD (<i>Biochemical Oxygen Demand</i>) dan COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>). Bila dibuang ke lingkungan tanpa diberi perlakuan akan menyebabkan pemecahan sumber oksigen alami dan terbentuknya kondisi septik.
Patogen	Penyakit komunitas dapat dipindahkan oleh organisme patogen dalam air.
Nutrien	Nitrogen dan fosfor serta karbon merupakan nutrien penting untuk pertumbuhan. Bila dibuang ke lingkungan akuatik, nutrien ini dapat menyebabkan tumbuhnya kehidupan akuatik yang tidak diinginkan. Bila dibuang dalam jumlah yang berlebihan ke tanah, juga akan menyebabkan pencemaran air tanah.
Polutan utama (<i>priority pollutant</i>)	Senyawa-senyawa organik dan anorganik berdasarkan toksisitas yang sudah diketahui atau dicurigai bersifat karsinogen, mutagen, teratogen, atau toksik sangat akut. Banyak dari senyawa-senyawa ini ditemukan dalam air limbah.
Bahan organik refraktori	Bahan-bahan organik ini cenderung sulit ditangani dengan teknik penanganan konvensional. Contohnya surfaktan, fenol, dan pestisida pertanian.
Logam-logam berat	Logam-logam berat umumnya ditambahkan dalam air limbah sebagai bagian dari kegiatan industri dan harus dihilangkan bila air limbah akan digunakan kembali.
Bahan anorganik terlarut	Senyawa anorganik seperti kalsium, natrium, dan sulfat ditambahkan ke dalam pasokan air dan harus dihilangkan bila air limbah akan digunakan kembali.

Pengaruh bau pada konsentrasi rendah terhadap manusia terutama berkaitan dengan stres psikologis yang ditimbulkan dibandingkan dengan bahayanya terhadap kesehatan. Bau yang menyengat dapat menyebabkan selera buruk terhadap makanan, menurunkan konsumsi air, gangguan pernafasan, mual dan muntah, serta gangguan mental.

Tabel 1.2.
Senyawa bau yang terkait dengan air limbah
yang tidak diberi perlakuan

Senyawa bau	Rumus kimia	Bau
Amin	$\text{CH}_3\text{NH}_2 \cdot (\text{CH}_3)_3\text{H}$	Seperti ikan
Amonia	NH_3	Amonia
Diamin	$\text{NH}_2(\text{CH}_2)_4\text{NH}_2 \cdot \text{NH}_2(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2$	Daging busuk
Hidrogen sulfida	H_2S	Telur busuk
Merkaptan (contoh : metil dan etil)	$\text{CH}_3\text{SH} \cdot \text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{SH}$	Kubis busuk
Merkaptan (contoh : T= butil dan krotil)	$\text{CH}_3\text{CSH} \cdot \text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{SH}$	Sigung (<i>Skunk</i>)
Sulfida organik	$(\text{CH}_3)_2\text{S} \cdot (\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{S}$	Kubis busuk
Skatol	$\text{C}_9\text{H}_9\text{N}$	Kotoran (fekal)

Suhu air limbah umumnya lebih tinggi daripada pasokan air karena penambahan air limbah dari kegiatan rumah tangga dan industri. Industri pangan yang menerapkan proses pengolahan panas, seperti pada industri pengalengan dan pengolahan tahu, akan menghasilkan air limbah dengan suhu yang lebih tinggi. Suhu air merupakan parameter penting karena memiliki dampak terhadap reaksi kimia dan laju reaksi, kehidupan akuatik, dan kecocokan air untuk penggunaan yang bermanfaat. Sebagai contoh, dengan meningkatnya suhu akan menyebabkan perubahan jenis ikan yang dapat hidup.

Oksigen bersifat kurang larut dalam air hangat daripada air dingin. Peningkatan laju reaksi biokimia seiring dengan meningkatnya suhu, dapat menyebabkan pemecahan konsentrasi oksigen terlarut yang cukup banyak pada musim panas. Apabila air limbah panas dibuang ke sungai, maka akan menyebabkan matinya ikan. Disamping itu, suhu tinggi dapat mendorong pertumbuhan tanaman air dan cendawan (*fungus*) dalam air limbah yang tidak diinginkan.

Suhu optimum aktivitas bakteri berada dalam kisaran 25 sampai 35°C. Pencernaan atau penguraian secara aerobik dan nitrifikasi akan berhenti bila suhu naik sampai 50°C. Bila suhu turun sampai 15°C, maka bakteri penghasil metana menjadi inaktif, dan pada suhu sekitar 5°C, bakteri autotrofik-nitrifikasi praktis tidak berfungsi. Pada suhu 2°C, bakteri kemoheterotrofik yang bekerja pada bahan berkarbon menjadi dorman. Suhu air limbah akan mempengaruhi kinerja proses penanganan biologis.

2. Sifat Kimia

Dalam air limbah berkekuatan sedang, sekitar 75 persen dari padatan tersuspensi dan 40 persen dari padatan tersaring bersifat organik. Padatan ini diperoleh dari hewan dan tanaman serta kegiatan manusia berkaitan dengan sintesis senyawa organik. Senyawa organik umumnya terdiri dari gabungan karbon, hidrogen dan oksigen, serta nitrogen. Unsur-unsur penting lain juga ditemukan seperti sulfur, fosfor, dan besi. Kelompok senyawa organik utama yang ditemukan dalam air limbah adalah protein (40 – 60 persen), karbohidrat (25 – 50 persen), serta lemak dan minyak (10 persen). Disamping bahan-bahan organik ini, air limbah juga mengandung sejumlah kecil berbagai ragam molekul organik mulai dari yang strukturnya sederhana sampai sangat kompleks. Contohnya, surfaktan (banyak digunakan untuk proses pembersihan pabrik), polutan organik utama, senyawa organik volatil (menguap), dan pestisida pertanian.

Protein. Protein merupakan senyawa utama yang berasal dari hewan dan dalam jumlah lebih kecil berasal dari tanaman. Semua bahan hewani dan nabati mentah mengandung protein. Jumlahnya beragam mulai dari persentase kecil dalam buah-buahan berair seperti tomat dan dalam jaringan daging berlemak sampai dalam persentase yang cukup tinggi dalam kacang-kacangan dan daging. Struktur kimia protein bersifat kompleks dan tidak stabil, merupakan bahan yang mengalami berbagai bentuk pemecahan. Sebagian protein bersifat larut dalam air, sebagian lain tidak larut dalam air. Pembentukan protein melibatkan gabungan atau pengikatan sejumlah besar asam amino. Berat molekul protein sangat tinggi, berkisar dari 20.000 sampai 20 juta.

Semua protein mengandung karbon, dan unsur lain yang umum untuk semua bahan organik seperti hidrogen, oksigen, dan nitrogen dengan proporsi yang cukup tinggi dan konstan, yaitu sekitar 16 persen. Dalam banyak kasus, juga terkandung sulfur, fosfor, dan besi. Urea dan protein merupakan sumber utama nitrogen dalam air limbah. Bila protein terdapat dalam jumlah besar, maka bau ekstrem busuk akan dihasilkan oleh hasil pemecahannya.

Karbohidrat. Karbohidrat tersebar luas di alam, termasuk gula, pati, selulosa, dan serat kayu. Semuanya ditemukan dalam air limbah. Karbohidrat mengandung karbon, hidrogen, dan oksigen. Karbohidrat umumnya mengandung enam atau kelipatannya dari atom-atom enam karbon dalam suatu molekul, serta hidrogen dan oksigen. Sebagian karbohidrat,

khususnya gula larut dalam air, sedangkan yang lainnya seperti pati, tidak larut air. Gula sering dipecah oleh enzim-enzim yang dihasilkan bakteri dan kamir tertentu, difermentasi dengan menghasilkan alkohol dan karbon dioksida. Di sisi lain, pati, lebih stabil tetapi dikonversi menjadi gula baik oleh kegiatan mikroorganisme atau asam-asam mineral encer. Dari sisi kamba dan ketahanan terhadap dekomposisi, selulosa merupakan karbohidrat yang paling penting yang ditemukan dalam air limbah. Destruksi selulosa dalam tanah berlangsung cepat sebagai hasil terutama oleh kegiatan berbagai jenis fungi, terutama bila berada pada kondisi pH asam.

Lemak, minyak, dan gemuk (grease). Lemak dan minyak merupakan komponen utama ketiga dari bahan pangan. Istilah "gemuk" (*grease*) umumnya digunakan untuk lemak, minyak, malam (*wax*) dan bahan lain serupa yang ditemukan dalam air limbah. "Gemuk" dalam air limbah dapat dipisahkan dengan cara mengekstraksinya dengan triklorotrifluoroetana. Bahan-bahan lain yang terekstraksi termasuk minyak mineral, seperti kerosin dan minyak pelumas.

Lemak dan minyak dalam air limbah dapat berasal dari mentega, margarin, dan lemak, serta minyak sayur. Lemak juga umumnya ditemukan dalam daging, dalam kecambah sereal, biji, kacang-kacangan, dan buah tertentu. Lemak bersifat lebih stabil dan tidak mudah terurai oleh bakteri. Asam-asam mineral dapat menguraikannya menjadi gliserin dan asam lemak. Apabila ada alkali seperti natrium hidroksida, maka akan terbentuk garam-garam alkali dari asam-asam lemak yang dikenal sebagai sabun dan bersifat stabil. Selanjutnya bila ada senyawa-senyawa yang menimbulkan kesadahan, maka akan diubah menjadi garam-garam kalsium dan magnesium yang bersifat tidak larut dan mengendap.

Kerosin (minyak tanah) dan minyak pelumas diperoleh dari petroleum dan batu bara yang mengandung karbon dan hidrogen. Minyak-minyak mineral sering mengganggu kegiatan biologis dan menimbulkan masalah pemeliharaan. Oleh karena itu limbah minyak ini perlu dikumpulkan secara terpisah dari limbah lainnya.

Surfaktan. Surfaktan (*surface active-agents*) atau bahan aktif permukaan, adalah bahan-bahan dengan berat molekul tinggi yang sedikit larut dalam air dan menyebabkan air limbah pabrik berbusa dan busa ini akan mengapung pada permukaan air tempat limbah dibuang. Surfaktan cenderung untuk mengumpul pada antar permukaan air-udara. Selama aerasi

air limbah, senyawa-senyawa ini akan mengumpul pada permukaan gelembung udara dan membentuk busa yang sangat stabil. Sebelum tahun 1965 jenis surfaktan yang terkandung dalam deterjen sintetik adalah alkil-benzen-sulfonat (ABS) dan sering menimbulkan masalah karena sulit dipecah secara biologis. Oleh karena itu, negara yang berkepentingan mengeluarkan peraturan untuk mengganti ABS dengan linier-alkil-sulfonat (LAS) yang dapat diuraikan secara biologis (*biodegradable*).

Polutan utama (priority pollutants). Polutan utama, baik organik maupun anorganik dipilih berdasarkan dampaknya terhadap kesehatan yang sudah diketahui atau dicurigai seperti karsinogenisitas (menyebabkan kanker), mutagenisitas (menyebabkan mutasi gen), teratogenisitas (keguguran), atau toksisitas akut tinggi. Banyak polutan utama juga dikelompokkan sebagai senyawa organik volatil (mudah menguap) (VOCs: *volatile organic compounds*).

Polutan utama dapat dikelompokkan sebagai nonlogam, logam, senyawa organik, senyawa halogen, serta pestisida, herbisida, dan insektisida seperti terlihat pada Tabel 1.3. Polutan organik utama dapat ditangani melalui salah satu metode berikut ini seperti penguapan, pemecahan (degradasi), penyerapan pada partikel dan lumpur, klorinasi atau hasil samping pemecahan senyawa prekursor.

Senyawa organik volatil (VOCs). Senyawa-senyawa organik yang memiliki titik didih lebih kecil atau sama dengan $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ atau tekanan uap lebih besar dari 1 mmHg pada suhu $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ umumnya ditetapkan sebagai senyawa organik volatil (VOCs). Salah satu senyawa organik yang ekstrim volatil adalah vinil klorida yang mempunyai titik didih pada $-13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan uap 2548 mmHg pada $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Senyawa organik volatil sangat penting diperhatikan karena dalam bentuk uap, senyawa ini lebih mudah menyebar dan hilang di lingkungan; keberadaan senyawa ini di udara dapat menimbulkan risiko yang nyata terhadap kesehatan masyarakat; dan senyawa ini akan meningkatkan hidrokarbon reaktif di udara.

Bahan anorganik. Air limbah mengandung bahan-bahan anorganik yang umumnya jarang diberi perlakuan untuk menghilangkannya sebelum dibuang ke permukaan air. Akan tetapi beberapa parameter perlu dianalisis seperti parameter pH, konsentrasi klorida, alkalinitas, dan nitrogen. Alkalinitas dalam air limbah dihasilkan oleh adanya hidroksida, karbonat, dan bikarbonat dari unsur-unsur seperti kalsium, magnesium, nitrat, kalium, atau amonia. Yang paling umum adalah kalsium dan magnesium bikarbonat.

Borat, silikat, fosfat, dan senyawa serupa juga berkontribusi alkalinitas limbah cair.

Tabel 1.3.
Polutan utama dalam air limbah industri dan pertanian

Kelompok polutan utama	Contoh polutan utama
Non logam	arsenik (As) dan selenium (Se)
Logam	barium (Ba), kadmium (Cd), kromium (Cr), timah hitam (Pb), merkuri (Hg), dan perak (Ag).
Senyawa organik	benzena, etilbenzena, dan toluen
Senyawa halogen	klorobenzena, kloroetena, diklorometana, tetrakloroetena
Pestisida, herbisida, dan insektisida	endrin (insektisida dan fumigan), lindan (pestisida) metoksiklor (insektisida) toksafen (insektisida dan fumigan) silvex (herbisida, pengatur pertumbuhan tanaman)

Unsur nitrogen dan fosfor penting untuk pertumbuhan protista dan tanaman, dan dikenal sebagai nutrisi atau biostimulan. Sejumlah kecil besi juga dibutuhkan untuk pertumbuhan. Oleh karena nitrogen merupakan unsur penting dalam sintesis protein, maka kadar nitrogen dalam air limbah penting dievaluasi apabila limbah akan ditangani secara biologis. Total nitrogen terdiri dari nitrogen organik, amonia, nitrit, dan nitrat. Bentuk fosfor yang umum ditemukan dalam larutan termasuk ortofosfat, polifosfat, dan fosfat organik.

Ion sulfat juga terdapat dalam air limbah yang dapat direduksi secara biologis di bawah kondisi anaerobik menjadi sulfida, yang selanjutnya dapat berikatan dengan hidrogen membentuk hidrogen sulfida (H_2S). H_2S yang terkumpul di pipa dapat dioksidasi secara biologis menjadi asam sulfat, yang bersifat korosif (menyebabkan karat).

Senyawa anorganik beracun (toksik) ditemukan dalam air limbah, banyak senyawa ini termasuk dalam kategori polutan utama. Cu, Pb, Ag, Cr, As, dan boron beracun terhadap mikroorganisme sehingga perlu dipertimbangkan dalam merancang penanganan biologis. Sebagian anion beracun termasuk sianida dan kromat juga terdapat dalam limbah industri dan dipisahkan dari limbah cair lain dan diberi perlakuan. Anion beracun lain adalah fluorida, umumnya ditemukan dalam air limbah dari industri elektronik.

Sejumlah kecil berbagai logam seperti nikel (Ni), mangan (Mn), timah hitam (Pb), kromium (Cr), seng (Zn), tembaga (Cu), besi (Fe), dan merkuri (Hg) merupakan logam berat penting dalam air limbah. Banyak dari logam-logam ini juga dikelompokkan dalam polutan utama (Tabel 1.3).

Berbagai jenis gas juga ditemukan dalam air limbah termasuk nitrogen (N_2), oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), dan metana (CH_4). Oksigen terlarut diperlukan untuk respirasi mikroorganisme aerobik dan makhluk hidup lain. Akan tetapi, oksigen hanya sedikit terlarut dalam air. Jumlah oksigen yang terdapat dalam larutan dipengaruhi oleh kelarutan gas, tekanan gas parsial dalam udara, suhu, dan kemurnian air (salinitas, padatan terlarut, dan lain-lain).

3. Sifat Biologi

Ahli teknik lingkungan harus memiliki pengetahuan yang cukup tentang karakteristik biologis dari air limbah, yaitu:

- a. kelompok utama mikroorganisme yang ditemukan dalam air permukaan dan air limbah;
- b. organisme patogenik yang dapat menimbulkan penyakit yang ditemukan dalam air limbah;
- c. organisme yang digunakan sebagai indikator polusi dan kepentingannya;
- d. metode yang digunakan untuk menghitung organisme indikator; dan
- e. metode yang digunakan untuk mengevaluasi toksisitas air limbah yang sudah diberi perlakuan.

Kelompok mikroorganisme utama yang ditemukan dalam air permukaan dan air limbah dapat dikelompokkan sebagai eukariot, eubakteria, dan archaeobakteria seperti yang terlihat pada Tabel 1.4. Kebanyakan bakteri dikelompokkan sebagai eubakteria. Kelompok protista dalam klasifikasi eukariot termasuk ganggang (*algae*), fungi, dan protozoa. Tanaman termasuk tanaman biji, *ferns* (sejenis tanaman air), dan *mosses* (lumut) dikelompokkan sebagai eukariot multiseluler (bersel jamak). Hewan-hewan bertulang belakang (*vertebrata*) dan tidak bertulang belakang (*invertebrata*) dikelompokkan sebagai eukariotik multiseluler. Virus juga ditemukan dalam air limbah, tetapi dikelompokkan terpisah sesuai dengan inang yang diinfeksi. Sifat-sifat mikroorganisme pengurai air limbah yang lebih rinci akan dibahas dalam Kegiatan Belajar 2.

Organisme patogen yang ditemukan dalam air limbah meliputi bakteri, virus, protozoa, dan helminths seperti terlihat pada Tabel 1.4. Organisme patogen yang dikeluarkan oleh manusia menyebabkan berbagai penyakit alat pencernaan seperti tifus, paratifus, disentri, diare, dan kolera. Oleh karena organisme patogen yang terdapat dalam air limbah sedikit dan sulit diisolasi dan diidentifikasi, maka digunakan koliform sebagai organisme indikator yang lebih banyak dan lebih mudah diuji. Bakteri koliform termasuk genus *Escherichia* dan *Aerobacter*. Organisme lain yang diusulkan sebagai indikator polusi adalah koliform fekal, *Klebsiella*, *E. coli*, streptokoki fekal, enterokoki, *Clostridium perfringens*, *Pseudomonas aeruginosa* dan *Aeromonas hydrophila*.

Tabel 1.4.
Klasifikasi mikroorganismen

Kelompok	Struktur sel	Karakterisasi	Anggota yang mewakili
Eukariot	Eukariotik (memiliki inti/nukleus sebenarnya)	Multiseluler	Tanaman (tanaman biji, ferns, lumut)
		Uniseluler	Hewan (vertebrata, invertebrata)
Eubakteria	Prokariotik (tidak mengandung membran inti)	Struktur kimia sel serupa dengan eukariot	Sebagian besar bakteri
Archaeobakteria	Prokariotik (tidak mengandung membran inti)	Struktur kimia berbeda	Metanogen, halofil, termasidofil

B. KARAKTERISTIK LIMBAH INDUSTRI PANGAN

Limbah industri pangan umumnya mengandung bahan-bahan yang berasal dari bahan pangannya sendiri seperti karbohidrat, protein, lemak, dan garam-garam serta sisa-sisa bahan kimia yang digunakan dalam pengolahan dan pembersihan. Oleh karena itu diperlukan teknik penanganan limbah yang efektif sesuai dengan kandungan komponen-komponen yang akan diuraikan dalam limbah industri pangan tertentu. Bila limbah tersebut tidak mendapat perlakuan yang tepat, maka akan menimbulkan masalah pencemaran lingkungan. Sebagai contoh, limbah dari industri susu, pembekuan dan pengeringan, industri pengolahan daging, unggas, dan hasil

laut serta industri pati dan pengolahan buah-buahan dan sayuran dapat menimbulkan bau yang tidak diinginkan dan polusi berat pada perairan (sungai atau laut) bila sebelum pembuangannya tidak diberi perlakuan yang tepat.

Kandungan bahan organik yang tinggi dalam air limbah industri pangan dapat merupakan sumber nutrisi untuk pertumbuhan mikroorganisme. Dengan pasokan makanan yang berlimpah, mikroorganisme akan berkembang biak dengan cepat dan mereduksi oksigen terlarut yang terdapat dalam air, karena untuk melangsungkan kegiatan ini, mikroorganisme memerlukan oksigen yang cukup banyak. Secara normal, air mengandung kira-kira 8 ppm oksigen terlarut. Standar minimum oksigen terlarut untuk kehidupan ikan adalah 5 ppm dan di bawah standar ini akan menyebabkan kematian ikan dan biota perairan lainnya. Pembuangan limbah industri pangan yang tidak diberi penanganan yang tepat akan menyebabkan kehidupan organisme dalam perairan terganggu dan akhirnya menimbulkan kematian dan timbul bau busuk yang menyengat akibat penguraian air limbah yang bersifat anaerobik karena oksigen terlarut sudah habis terpakai pada saat awal penguraian air limbah.

Kandungan bahan organik dari suatu limbah biasanya dinyatakan dengan parameter **BOD** atau "*Biological Oxygen Demand*". BOD dapat didefinisikan sebagai jumlah oksigen terlarut yang dikonsumsi atau digunakan oleh kegiatan kimia atau mikrobiologi, bila sampel air limbah diinkubasi dalam keadaan gelap, umumnya selama 5 hari pada suhu tertentu (20°C). Oleh karena oksigen dibutuhkan untuk oksidasi bahan organik, maka nilai BOD dapat digunakan sebagai indikasi kasar banyaknya kandungan bahan organik dalam sampel tersebut. Efluen limbah cair dengan BOD tinggi dapat menimbulkan masalah polusi bila dibuang langsung ke dalam suatu perairan atau badan air, karena pengambilan oksigen ini akan mengakibatkan keseimbangan ekologi dengan cepat terganggu yang selanjutnya dapat menyebabkan kematian ikan dan biota perairan lainnya. Kelebihan nitrogen dan fosfor dalam air yang berasal dari industri pangan menyebabkan suatu keadaan yang tidak seimbang yang disebut **eutrofikasi**.

Eutrofikasi adalah suatu fenomena yang melibatkan banyak faktor seperti kekeruhan, sedimen, produktivitas, dan suhu rata-rata. Ganggang menyebabkan eutrofikasi karena menambahkan bahan organik pada sistem. Bila tersedia nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan ganggang, maka akan terjadi ledakan populasi ganggang. Selama ledakan populasi ganggang,

maka akan terjadi perbedaan kadar oksigen dalam air yang besar antara siang dan malam hari. Pada malam hari, respirasi ganggang berlanjut, dan terjadi pemecahan oksigen. Ganggang yang mati akan mengendap ke bagian dasar danau dan dioksidasi oleh bakteri, yang menghasilkan lumpur dan pemecahan oksigen.

Bila oksigen terlarut dalam air habis sama sekali karena kadar bahan organik yang tinggi, maka akan timbul bau busuk dan warna air menjadi gelap. Bila protein yang terdapat dalam air mengandung sulfur atau kandungan sulfat alami dari air tinggi, maka akan dihasilkan hidrogen sulfida yang menimbulkan bau yang tidak diinginkan dan menyebabkan bangunan di sekitarnya yang dicat akan berwarna hitam.

Pada umumnya, industri pangan harus menangani pengelolaan limbahnya sendiri. Pada kawasan industri tertentu, contohnya seperti yang ditemukan di kawasan industri di Purwakarta ada perusahaan yang khusus memberikan jasa penanganan limbah di sekitar kawasan industri tersebut, sehingga industri yang berminat dapat menggunakan jasanya, tanpa melakukan penanganan sendiri. Paling sedikit diperlukan penyaringan bahan-bahan padat dan penghilangan lemak serta gemuk atau bahan pelumas (*grease*), sebelum limbah dibuang ke dalam saluran pembuangan. Apabila tidak tersedia fasilitas kota atau jasa penanganan limbah seperti contoh di atas, maka industri pangan harus menyediakan sendiri sistem penanganan, pemberian perlakuan dan pembuangan limbah industrinya. Sistem seperti ini membutuhkan perlakuan cara-cara kimia atau biologi terhadap limbah pabrik, dan hal ini umumnya membutuhkan biaya yang mahal. Guna menekan biaya tinggi ini, dapat dilakukan pemisahan kembali produk-produk yang bermanfaat dari limbah tersebut, yang dapat dijual sebagai produk sampingan. Satu hal penting ialah limbah apapun juga harus dibuang sesegera mungkin sehingga hama-hama tidak sempat bersarang dan bau-bau yang tidak diinginkan tidak sempat terbentuk.

Teknologi yang dapat diterapkan untuk memenuhi persyaratan efluen untuk industri pangan (Tabel 1.5) telah banyak digunakan dalam sistem pengendalian polusi. Seperti yang telah dibahas di muka, pengetahuan akan sifat-sifat limbah industri pangan sangat penting untuk mengembangkan suatu sistem pengolahan limbah yang layak. Metode penanganan dan pembuangan limbah yang telah berhasil dilakukan untuk limbah industri lain belum tentu berhasil diterapkan pada limbah pertanian, kecuali bila dimodifikasi terlebih dahulu. Limbah yang diproduksi oleh industri

pertanian bervariasi dalam kuantitas dan kualitasnya. Limbah dari industri pangan merupakan limbah yang berbeban rendah, volume carian tinggi, sedangkan yang berasal dari peternakan cenderung berbeban tinggi tetapi volume rendah.

Tabel 1.5.
Berbagai teknik penanganan limbah yang dapat diterapkan untuk limbah industri pangan

Jenis industri	Teknik penanganan
Produk susu	Penanganan biologis, pengendalian di dalam pabrik, filtrasi pasir
Penggilingan biji-bijian	Penanganan biologis, pengendalian di dalam pabrik, filtrasi pemisahan padatan biologis
Pengalengan dan pengawetan buah-buahan dan sayuran	Penanganan biologis, pemisahan padatan dari efluen, desinfeksi, peningkatan pengendalian di dalam pabrik
Pengalengan dan pengawetan hasil laut	Pengendalian dalam pabrik, saringan, penanganan biologis.
Pemurnian gula	Penanganan biologis, pemisahan padatan dari efluen, pengendalian dalam pabrik, aplikasi biologis.
Produk daging dan proses <i>rendering</i>	Pengendalian dalam pabrik, penanganan biologis, pemisahan lemak (lemak), nitrifikasi, amonia <i>stripping</i> , pemisahan padatan efluen.

Pengetahuan mengenai sifat-sifat limbah akan sangat membantu dalam penetapan metode penanganan dan atau pembuangan limbah yang efektif. Penanganan biologik biasanya cocok dilakukan pada limbah cair yang mengandung bahan padatan organik terlarut. Limbah padat dengan kadar organik tinggi cocok untuk pembakaran atau pemupukan. Alternatif lain dapat dilihat pada Tabel 1.6. Pada umumnya, dalam air limbah pengolahan pangan, bahan kamba yang membutuhkan oksigen berada dalam bentuk terlarut, sedangkan dalam limbah peternakan sebagian besar bahan terdapat dalam bentuk partikulat.

Informasi mengenai debit dan mutu limbah yang dikeluarkan diperlukan untuk merancang fasilitas yang diperlukan untuk mengelola pengeluaran yang konstan atau sewaktu-waktu, yang disebabkan oleh sifat limbah peternakan. Identifikasi sumber-sumber limbah di dalam pabrik pengolahan memberikan informasi untuk pemisahan air limbah di dalam pabrik, untuk penggunaan kembali air yang sedikit terkontaminasi, dan untuk pengaturan

kondisi proses yang menghasilkan limbah dalam jumlah yang besar atau pekat.

Tabel 1.6.
Teknik penanganan dan pembuangan yang layak dari
limbah industri dengan karakteristik berbeda

Limbah	Metode penanganan dan pembuangan
CAIRAN	
Limbah organik terlarut	Penanganan biologis, penimbunan lahan
Bahan anorganik terlarut	Penimbunan lahan, perlakuan fisik atau kimia
Limbah organik tersuspensi	Sedimentasi penanganan biologis, presipitasi kimia, penimbunan lahan
Bahan anorganik tersuspensi	Sedimentasi, penimbunan lahan, perlakuan kimia
PADATAN	
Limbah organik	Insinerasi, pupuk, penimbunan lahan, dehidrasi.
Limbah anorganik	Kondisi tanah, pakan ternak, penimbunan tanah

Industri pengolahan pangan meliputi pengolahan beraneka ragam jenis makanan seperti buah-buahan dan sayuran, daging, susu, dan hasil laut. Setiap industri pangan mempunyai limbah yang berbeda dalam kuantitas dan kualitas.

Limbah cair pengolahan pangan umumnya mempunyai kandungan nitrogen yang rendah, BOD dan padatan tersuspensi tinggi, dan proses dekomposisi berlangsung dengan cepat. Beberapa jenis limbah seperti pengolahan bit, mempunyai warna yang intensif. Limbah cair segar mempunyai pH mendekati netral dan selama penyimpanan pH menjadi turun. Selain kandungan organik, limbah pengolahan buah dan sayuran dapat mengandung polutan seperti tanah, larutan alkali, panas (kalor), dan insektisida. Limbah pengolahan makanan dihasilkan dari pencucian, pemotongan, blansir, pasteurisasi, pembuatan jus bahan mentah, pembersihan peralatan pengolahan, dan pendinginan produk akhir. Pada kebanyakan pabrik, air pendingin mempunyai tingkat kontaminasi rendah dan dapat digunakan kembali untuk pencucian dan pengangkutan bahan mentah.

Komponen limbah cair dari industri pangan sebagian besar adalah bahan organik. Fluktuasi aliran dan muatan organik harus dievaluasi secukupnya bila limbah diizinkan memasuki fasilitas penanganan kota. Pengolahan buah dan sayuran dapat menyebabkan beban berlebihan dalam fasilitas ini yang disebabkan karena karakteristik yang bervariasi dan musim pengolahan yang

singkat. Pengolahan daging, unggas, dan susu kurang musiman dibandingkan sayuran dan buah-buahan.

1. Buah dan Sayuran

Volume air limbah dan kandungan bahan organik di antara industri-industri yang mengolah produk yang sama mempunyai kisaran yang lebar. Perbedaan ini disebabkan adanya perbedaan cara-cara pengolahan dari produk yang sama, seperti pengupasan dengan pembuatan bubur atau pengirisan dengan bentuk utuh. Volume air limbah dan kekuatan organik bervariasi dengan musim dan hari pengoperasian. Dengan demikian, fasilitas-fasilitas untuk penanganan air limbah sebaiknya dirancang untuk sewaktu-waktu mengelola volume yang besar daripada untuk laju aliran yang konstan dan konsentrasi bahan organik yang konstan.

Volume dan tingkat polusi limbah dapat dikurangi dengan mengendalikan operasi penanganan yang ketat. Untuk itu, faktor-faktor berikut ini perlu lebih diperhatikan:

- a. mengurangi kebutuhan air segar dengan menggunakan sistem daur ulang;
- b. memisahkan limbah padat dengan perlakuan separasi;
- c. memodifikasi proses untuk meminimumkan timbulnya limbah;
- d. pendidikan personalia mengenai pengendalian polusi dan penghematan air.

Kebanyakan limbah pengolahan buah dan sayuran mempunyai pH tinggi, karena penggunaan kaustik seperti larutan alkali dalam pengupasan. Larutan kaustik ini dapat mempunyai pH sekitar 12 – 13 dan dibuang sewaktu-waktu. Limbah piket dan sauerkraut bersifat asam dan mengandung konsentrasi klorida yang tinggi dan juga bahan organik.

Metode pengupasan kaustik kering dapat mereduksi beban limbah. Suatu unit percobaan untuk buah peach mampu mengurangi volume air limbah sebanyak 93 persen, COD sebanyak 70 persen dan padatan tersuspensi 70 persen. Studi yang lebih ekstensif terhadap pengupasan kentang dengan kaustik kering menunjukkan bahwa kira-kira dibutuhkan air empat kali lebih banyak dalam proses pengupasan basah daripada dalam proses kaustik kering. Jumlah padatan kering (lb) per ton kentang yang dihasilkan dengan sistem pengupasan kaustik basah kira-kira 3,75 kali dari sistem kaustik kering. Hal ini serupa dengan jumlah BOD (lb) per ton kentang kira-kira 4,5 kali lebih besar dengan sistem basah daripada dengan sistem kaustik kering.

Pengupasan kaustik kering juga telah dibuktikan efektif untuk buah *peach*. Air yang digunakan berkurang sebanyak 90 persen dan jumlah BOD, COD, dan padatan tersuspensi yang dikeluarkan per unit produksi menurun hingga sekitar 60 persen.

2. Daging Sapi dan Unggas

Limbah utama berasal dari penyembelihan, penghilangan bulu, penanganan isi perut, *rendering*, pemotongan bagian-bagian yang tidak berguna, pengolahan, dan pekerjaan pembersihan. Limbah mengandung darah, lemak, padatan anorganik dan organik, dan garam-garam serta bahan kimia yang ditambahkan selama kegiatan penanganan. Kandungan BOD dan konsentrasi padatan dalam efluen pabrik akan tergantung pada pengawasan pabrik terhadap air yang digunakan, pengambilan kembali produk samping, pemisahan limbah, dan manajemen pabrik. Perbedaan cara pengolahan daging akan menghasilkan aliran dan konsentrasi limbah yang beragam.

Bagian bukan daging dari hewan memberikan beban limbah yang nyata. Sejauh memungkinkan, bahan-bahan seperti ini sebaiknya dipisahkan dari aliran limbah umum pada sumbernya. Untuk memperoleh kembali bahan-bahan yang berguna dari limbah ini dapat dilakukan berbagai cara untuk dapat digunakan sebagai pakan ternak, *rendering* (pengubahan), dan penggunaan lain.

Darah sapi mempunyai BOD₅ sebesar 156.500 mg/l, COD 218.300 mg/l, kadar air 82 persen dan pH 7,3. Berat rata-rata dari darah basah yang dihasilkan untuk setiap 1000 lb daging sapi adalah 32,5 lb. Pengambilan kembali darah merupakan aspek penting dalam pengendalian polusi dan sebaiknya dilakukan oleh semua industri pengolahan hewan.

Dalam hewan ruminansia, perut pertama mengandung bahan-bahan yang tidak dapat dicerna. Cara-cara pemisahan dan pembuangan isi perut akan mempengaruhi beban limbah dari pabrik. Bahan-bahan isi perut mempunyai kadar air kira-kira 88 persen, dengan rata-rata COD 177.300 mg/lb dan rata-rata BOD₅ 50.200 mg/l. Bagian padatan isi perut mengandung beban polusi terbesar, kira-kira 73 persen COD dan 40 persen BOD. Bagian isi perut ini menghasilkan kira-kira sebanyak 8,8 lb COD dan 2,5 lb BOD untuk setiap 1000 lb berat hewan hidup yang disembelih. Pemisahan bahan isi perut pada sumbernya dikombinasi dengan penanganan limbah padat dan pembuangannya akan menurunkan beban limbah cair total pada industri pemotongan hewan.

Proses *rendering* akan mengambil kembali bagian-bagian yang tidak dapat dimakan dari hewan. Proses ini mengubah produk sampingan hewan menjadi lemak, minyak, dan padatan yang mengandung protein. Panas digunakan untuk mencairkan lemak dari jaringan, untuk menggumpalkan protein sel dan untuk menguapkan air dari bahan mentah. *Rendering* dapat menghasilkan bahan pengisi makanan ternak dari darah hewan, bulu, tulang, jaringan lemak, sisa-sisa daging, karkas hewan yang tidak dapat dimakan dan kotoran hewan.

Rendering kering seperti pemasakan secara vakum dan suhu rendah tanpa penambahan air, menghasilkan suatu polutan yang minimum pada aliran limbah pabrik. *Rendering* basah dalam air mengandung bahan organik terlarut dan mempunyai BOD yang tinggi, kira-kira 30.000 mg/l.

Industri pengolahan unggas termasuk penyembelihan, pembersihan bulu dan isi perut, dan daging broiler es atau beku, daging ayam, kalkun, bebek dan unggas lain. Sebagian industri hanya melakukan proses penyembelihan dan pembersihan (*dressing*), ada yang melakukan penyembelihan, pembersihan dan proses lebih lanjut, dan ada juga hanya melakukan proses lanjutan saja. Pengolahan lebih lanjut mengubah unggas bersih menjadi berbagai macam produk seperti daging masak, kaleng, panggang setelah dimasak lebih dahulu, "*rolls*", "*patties*", irisan daging dalam "*gravy*", dan daging ayam bertulang yang dikalengkan.

Limbah dari industri pengolahan unggas dapat berasal dari penyembelihan, penghilangan bulu, pembuangan isi perut, pencucian, pendinginan dan operasi pembersihan. Jumlah dan mutu limbah tergantung pada cara penanganan darah dan bulu, jenis peralatan pengolahan yang digunakan, dan cara pengolahan pengendalian polusi dalam pabrik. Di dalam pabrik yang sangat modern limbah dari pembersihan isi perut dan bulu, kotoran dan darah dari mesin pelepas bulu dibuang ke dalam aliran limbah. Aliran ini biasanya akan melalui saringan yang akan memisahkan padatan berukuran besar. Biasanya air pendingin dan pengemas serta limbah pembersihan juga melalui saringan.

Dalam pengolahan broiler, sekitar 70 persen dari berat asal unggas merupakan produk akhir. Sisa 30 persen meliputi bulu, usus, kaki, kepala, dan darah yang membutuhkan pembuangan cairan dan padatan pada pabrik pengolahan. Limbah yang paling menimbulkan polusi adalah darah yang berasal dari operasi pembunuhan. Sekitar 8 persen dari berat tubuh ayam adalah darah dan sekitar 70 persen dapat dikeluarkan. Darah yang dapat

dikeluarkan mempunyai muatan polusi sebesar 17 lb BOD/1000 ayam yang diolah. Dengan pengambilan kembali darah, muatan BOD dan padatan tersuspensi dapat dikurangi masing-masing sebesar 15 lb dan 10 lb/1000 unggas yang diolah.

3. Susu

Limbah pengolahan susu dihasilkan dari pengolahan dan operasi pemindahan setelah susu dari petani mencapai stasiun penerima pusat. Limbah terdiri dari susu penuh dan olah, *whey* dari produksi keju, dan air pencuci. Limbah pengolahan susu segar mempunyai bahan organik terlarut yang tinggi dan bahan tersuspensi yang rendah. BOD dari susu penuh sekitar 100.000 mg/l.

Senyawa pembersih (*cleaning agents*) akan menambah kebutuhan oksigen dari limbah. Surfaktan dan deterjen asam yang umum digunakan dalam pembersihan peralatan pabrik makanan mempunyai nilai BOD sekitar 0,65 lb/lb produk. Alkali seperti natrium hidroksida, juga digunakan untuk pembersihan pabrik susu. Di bawah kondisi rata-rata dalam suatu pabrik susu modern, jumlah BOD yang berasal dari surfaktan dan deterjen asam kira-kira sebesar 0,1 lb/1000 lb susu yang diolah.

Polutan terbesar dari air limbah industri susu adalah *whey* dari operasi produksi keju diikuti dengan air pencucian dan air pasteurisasi. Pembuatan keju, baik dari susu penuh atau susu skim menghasilkan keju dan cairan berwarna kuning kehijauan yang dikenal sebagai *whey*. Susu penuh digunakan untuk memproduksi keju natural dan keju olah seperti *cheddar* dan cairan yang dihasilkan disebut *whey* manis dengan pH berkisar antara 5 dan 7. Susu skim digunakan untuk memproduksi keju *cottage* dan cairan produk sampingan adalah *whey* asam dengan pH 4 hingga 5. Setiap *pound* (lb) keju yang diproduksi menghasilkan 60.000 mg/l tergantung pada proses pembuatan keju yang digunakan. *Whey* mengandung sekitar 5 persen laktosa, 1 persen protein, 0,3 persen lemak, dan 0,6 persen abu. Oleh karena protein telah digumpalkan sebagai keju, evaluasi kadar nitrogen *whey* harus dilakukan untuk menjamin nitrogen yang cukup untuk penanganan biologis.

4. Hasil Laut

Derajat limbah dalam industri pengolahan hasil laut sangat bervariasi. Ikan yang diolah menjadi tepung ikan tidak menghasilkan limbah padat. Pengolahan kepiting menghasilkan limbah padat hingga mencapai 85 persen. Setiap operasi pengolahan ikan akan menghasilkan cairan dari pemotongan,

pengucian, dan pengolahan produk. Cairan ini mengandung darah dan potongan-potongan kecil ikan dan kulit, isi perut, kondensat dari operasi pemasakan, dan air pendingin dari kondenser.

Variasi dalam pabrik pengolahan ikan tawar disebabkan oleh jenis ikan, teknik pengolahan, ukuran pabrik, penggunaan air, dan lamanya limbah padat kontak dengan air limbah. Kekuatan polusi akan makin tinggi bila kontak lebih lama.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Sebutkan kontaminan penting apa saja yang terkandung dalam air limbah industri?
- 2) Apakah yang dimaksud dengan polutan utama (*priority pollutant*)?
- 3) Apakah yang Anda ketahui tentang fenomena **eutrofikasi**?
- 4) Adakah perbedaan yang nyata antara kandungan limbah cair industri nonpangan dengan industri pangan? Jelaskan jawaban Anda!
- 5) Sebutkan polutan penting yang sering terkandung dalam air limbah!
- 6) Apakah yang dimaksud dengan BOD?

Petunjuk Jawaban Latihan

Untuk menjawab soal-soal dalam latihan ini, Anda harus mempelajari kembali materi Kegiatan Belajar 1 tentang:

1. Karakteristik limbah industri dan pertanian.
3. Karakteristik limbah industri pangan.
4. Sifat-sifat kimia air limbah.
5. Sifat-sifat biologis limbah industri pangan.



RANGKUMAN

Karakteristik air limbah penting dipahami sebelum kita merancang dan mengoperasikan kegiatan pengumpulan, teknik penanganan, dan fasilitas pembuangan, serta dalam manajemen keteknikan kualitas

lingkungan. Karakteristik air limbah umumnya meliputi sifat-sifat fisik, kimia, dan biologis.

Berbagai kontaminan penting dapat ditemukan dalam air limbah industri dan pertanian yang dikelompokkan menjadi padatan tersuspensi, bahan organik yang dapat dihancurkan secara biologis (*biodegradable*), mikroorganisme patogen, bahan makanan untuk mikroorganisme sebagai nutrisi, polutan utama, bahan organik refraktori, logam-logam berat, dan bahan organik terlarut.

Volume dan tingkat polusi limbah industri pangan secara umum dapat dikurangi dengan mengendalikan operasi penanganan yang ketat dengan memperhatikan faktor-faktor berikut:

- (a) mengurangi kebutuhan air segar dengan menggunakan sistem daur ulang;
- (b) memisahkan limbah padat dengan perlakuan separasi;
- (c) memodifikasi proses untuk meminimumkan timbulnya limbah;
- (d) pendidikan personalia mengenai pengendalian polusi dan penghematan air.

Limbah utama dari industri pengolahan daging dan unggas, serta hasil laut (*seafoods*) umumnya lebih kompleks dibandingkan industri pengolahan buah dan sayuran serta biji-bijian. Limbah industri pengolahan pangan hewani tersebut berasal dari penyembelihan, penghilangan bulu, penanganan isi perut, rendering, pemotongan bagian-bagian yang tidak berguna, pengolahan, dan pekerjaan pembersihan. Limbah mengandung darah, lemak, padatan anorganik dan organik, dan garam-garam, serta bahan kimia yang ditambahkan selama kegiatan penanganan.

Berbagai teknik penanganan limbah cair industri pangan yang dapat diterapkan meliputi penanganan biologis, penimbunan lahan, perlakuan fisik atau kimia, sedimentasi, penanganan biologis, dan presipitasi kimia. Untuk penanganan limbah padat dapat dilakukan penanganan antara lain insinerasi, diolah menjadi pupuk dan pakan ternak, penimbunan lahan, dan dikeringkan.



TES FORMATIF 1 _____

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Jika kita membuang air limbah panas ke sungai maka akan mengakibatkan timbulnya beberapa hal seperti yang disebutkan di bawah ini, *kecuali*

- A. meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut
 - B. tanaman luar tumbuh dengan tidak terkendali
 - C. sebagian ikan yang hidup di sungai menjadi mati
 - D. beberapa cendawan yang tidak diinginkan menjadi tumbuh
- 2) Triklorotrifluoroetana biasanya digunakan untuk mengekstrak senyawa
- A. pati
 - B. protein
 - C. lemak
 - D. karbohidrat
- 3) Kadar bahan organik yang tinggi dalam air dapat mengakibatkan oksigen terlarut dalam air habis sama sekali dan mengakibatkan warna air berubah menjadi...
- A. putih
 - B. gelap
 - C. kuning
 - D. putih kekuningan
- 4) Limbah padat TIDAK dihasilkan oleh industri pengolahan ikan laut yang mengolah ikan menjadi
- A. *fillet*
 - B. tepung
 - C. ikan beku
 - D. ikan kaleng

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kegiatan Belajar 2

Mikroorganisme Pengurai Komponen Organik Air Limbah

Mikroorganisme merupakan dasar fungsional untuk sejumlah proses penanganan air limbah. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan dan pemeliharaan kultur mikroba yang cocok. Proses penanganan air limbah secara biologis terdiri dari campuran mikroorganisme yang mampu melakukan metabolisme pada limbah organik. Mikroorganisme yang ditemukan dalam air dan air limbah digolongkan dalam empat kelompok yaitu: virus, organisme prokariotik, organisme eukariotik, dan invertebrata sederhana. Organisme prokariotik dan eukariotik bersel tunggal, sedangkan invertebrata bersel jamak. Virus adalah partikel-partikel yang tidak hidup yang berikatan dengan organisme hidup. Bakteri suatu grup prokariotik, adalah organisme yang mendapat perhatian utama, baik dalam air maupun dalam penanganan air limbah.

A. BAKTERI

Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme terpenting dalam sistem penanganan air limbah, karena beberapa jenis bersifat patogenik (menyebabkan penyakit) dan karena kultur bakteri dapat digunakan untuk menghilangkan bahan organik dan mineral–mineral yang tidak diinginkan dari air limbah.

Kebanyakan bakteri adalah kemoheterotrofik yaitu menggunakan bahan organik sebagai sumber energi dan karbon. Beberapa spesies mengoksidasi senyawa-senyawa anorganik tereduksi seperti NH_3 untuk energi dan menggunakan CO_2 sebagai sumber karbon. Bakteri ini disebut kemoautotrof. Sebagian bakteri bersifat fotosintetik dan menggunakan sinar sebagai sumber energi dan karbon dioksida sebagai sumber karbon. Bakteri kemoheterotrofik merupakan bakteri terpenting dalam penanganan air limbah karena bakteri-bakteri ini akan memecah bahan organik. Bakteri kemoautotrofik juga memegang peranan penting dalam penanganan limbah, terutama bakteri nitrifikasi yang mengoksidasi amonia nitrogen menjadi nitrogen nitrat.

Bagian reaktif dari sel bakteri adalah membran sitoplasmik. Walaupun beberapa reaksi enzimatik terjadi di luar membran, tetapi tidak ada reaksi yang melepaskan energi untuk digunakan oleh sel. Sel bakteri mampu bertahan tanpa dinding sel tetapi tidak dapat hidup tanpa membran sitoplasmik yang utuh. Semua bahan, organik atau anorganik, yang akan dimetabolisme oleh sel harus melalui membran. Mekanisme transpor dari sebagian besar molekul yang melalui membran diduga disebabkan karena reaksi-reaksi dengan sistem enzim spesifik yang disebut permease. Molekul-molekul yang tidak mempunyai sistem permease tidak dapat memasuki sel dan oleh karenanya tidak dimetabolisme. Hal ini menjelaskan mengapa bakteri menggunakan nutrisi secara selektif dan alasan mengapa diperlukan kultur campuran dalam penanganan air limbah. Setiap jenis bakteri mempunyai kelompok senyawa yang dapat dimetabolisme yang berbeda. Dengan demikian kultur campuran mempunyai kemampuan untuk memetabolisme berbagai jenis senyawa. Suatu jenis bakteri mungkin mempunyai kemampuan untuk mensintesis sistem permease untuk suatu bahan organik tertentu walaupun sistem ini secara normal tidak ada. Bila terdapat suatu jenis bahan organik tertentu, maka sistem akan disintesis, dan bahan dimetabolisme.

Sebagian bakteri mempunyai kapsul atau lapisan lendir yang tebalnya bervariasi. Komponen kimia yang terdapat dalam kapsul terdiri dari berbagai polimer organik seperti polisakarida, polisakarida kompleks dan polipeptida. Selulosa, yang terdapat dalam sel tanaman tetapi tidak dalam dinding sel bakteri, ditemukan dalam lapisan lendir dan kapsul dari beberapa jenis bakteri.

Pemisahan lapisan lendir dari sel tidak akan mempengaruhi metabolisme sel atau laju pertumbuhan. Akan tetapi, sifat-sifat antigenik tertentu akan berubah. Sebagai contoh, daya virulen dari *Streptococcus pneumoniae* akan hilang bila lapisan kapsul dihilangkan.

Lapisan lendir diduga berfungsi sebagai pengikat untuk partikel-partikel flok bakteri. Partikel-partikel ini terdiri dari sejumlah besar sel-sel individu, yang terbentuk dalam proses penanganan limbah secara biologis dan memungkinkan pemisahannya dengan sedimentasi gravitasi. Lapisan lendir dari jenis bakteri yang digunakan dalam proses lumpur aktif (*activated-sludge*) lebih banyak terdapat pada kultur tua atau yang sedang istirahat. Kultur-kultur yang tumbuh dengan cepat biasanya mempunyai sedikit lapisan lendir, dan flokulasi juga menjadi rendah.

Beberapa jenis bakteri bersifat motil karena mempunyai flagela. Bakteri motil umumnya tidak terlalu diinginkan dari sudut penanganan limbah, tetapi bakteri ini dapat memberikan tanggapan terhadap gradien fisik dan kimia dengan bergerak dari kondisi yang kurang menguntungkan menuju kondisi yang lebih baik.

Bakteri aerob dan fakultatif bergerak aktif dalam semua unit penanganan aerobik, sedangkan bakteri anaerob fakultatif dan obligat bergerak aktif dalam unit penanganan anaerobik. Bakteri terdapat dalam berbagai bentuk, biasanya modifikasi dari silinder atau ovoid (bulat), dengan ukuran beberapa mikrometer. Bakteri ini terdapat dalam proses penanganan limbah dalam bentuk gumpalan dari berbagai bentuk dan jenis.

Mikroba adalah sistem organisme yang kompleks. Rumus untuk mewakili sel bakteri adalah $C_5H_7O_2N$ atau $C_{75}H_{105}O_{30}N_{15}P$. Komposisi bakteri tidak konstan dan bervariasi tergantung tingkat pertumbuhan dan substrat utama yang digunakan. Rumus empiris ini hanya menyatakan proporsi rata-rata dari komponen-komponen pengisi utama dalam sel bakteri. Komposisi dasar dari sel bakteri secara proksimat dapat dilihat pada Tabel 1.7.

Jenis mikroba yang mempunyai laju pertumbuhan tercepat dan kemampuan untuk menggunakan sebagian besar dari bahan organik yang ada akan merupakan jenis pradominan. Pergeseran mikroba pradominan dalam sistem penanganan limbah terjadi bila kondisi lingkungan seperti suhu, pH, oksigen terlarut, aseptor, atau makanan yang tersedia dalam sistem berubah.

Karakteristik yang berguna dari sebagian bakteri adalah kemampuannya untuk menggumpal. Flokulasi seperti ini akan memisahkan padatan mikro dalam unit pemisahan padatan dan membantu dalam menghasilkan efluen yang bermutu baik.

B. FUNGI

Fungi adalah mikroorganisme nonfotosintesis, bersel jamak, aerobik, bercabang, berfilamen, dan memiliki kemampuan memetabolisme makanan terlarut. Bakteri dan fungi dapat melangsungkan metabolisme bahan organik dari jenis yang sama. Kondisi lingkungan akan menentukan kelompok mikroorganisme mana yang akan berkembang pesat. Fungi akan banyak terdapat bila limbah mempunyai pH rendah, kadar air rendah, nitrogen rendah, dan bila nutrisi tertentu tidak ada. Komposisi sel fungi dapat dinyatakan secara empiris sebagai $C_{10}H_{17}O_6N$.

Tabel 1.7.
Komposisi dasar sel bakteri secara proksimat

Unsur	% berat kering
Karbon	50
Oksigen	20
Nitrogen	14
Hidrogen	8
Fosfor	3
Sulfur	1
Kalium	1
Kalsium	0.5
Magnesium	0.5
Klorin	0.5
Besi	0.2
Lain-lain	0.3

Fungi tidak aktif dalam sistem anaerobik. Oleh karena sel-sel fungi berisi lebih sedikit nitrogen daripada sel bakteri, fungi akan berkompetisi lebih baik dalam limbah yang mempunyai kadar nitrogen yang rendah daripada yang dibutuhkan untuk sintesis bakteri. Kebanyakan fungi tumbuh baik pada pH 4 hingga 5, yang dalam kondisi ini bakteri sulit berkompetisi.

Sifat membentuk filamen dari fungi membuat organisme ini kurang diinginkan dalam unit penanganan limbah secara biologik, karena tidak dapat mengendap dengan baik. Di bawah kondisi normal yang ada dalam kebanyakan proses penanganan air limbah, umumnya fungi tidak akan banyak berkembang.

C. VIRUS

Virus berada di antara benda-benda hidup dan tak hidup. Virus ini bukan merupakan organisme sempurna, terbentuk dari lapisan pelindung protein yang mengelilingi serabut asam nukleat. Semua virus adalah parasit obligat karena cara reproduksinya melibatkan sel-sel hidup tersebut untuk memproduksi partikel virus baru.

Replikasi partikel-partikel virus dimulai dengan adsorpsi virus pada sel yang peka. Virus sangat spesifik terhadap sel inangnya, oleh karena itu jenis sel sangat penting. Hanya asam nukleat dari virus yang memasuki sel. Asam nukleat ini kemudian bermigrasi menuju nukleus sel, dan dengan cara tertentu, memerintahkan mekanisme sintesis untuk memproduksi partikel-

partikel virus baru. Setelah sejumlah partikel baru diproduksi, membran sel akan pecah, dan partikel dilepaskan ke dalam lingkungan. Waktu yang diperlukan mulai dari penetrasi sampai pelepasan partikel dapat berlangsung hanya dalam 20 menit.

Perhatian utama pada virus bila terdapat dalam air adalah terhadap kesehatan masyarakat. Sejumlah penyakit virus digolongkan sebagai berasal dari atau ditularkan melalui air (*waterborne*), termasuk infeksi polio, hepatitis, dan virus *Coxsackie*. Konsentrasi virus dalam air buangan adalah 1 sampai 2/ml. Akan tetapi mengingat satu viron tunggal dapat menyebabkan infeksi, maka konsentrasi yang rendah belum menjamin keamanan.

Aktivitas virus tidak menurun ketika berada di luar sel inang. Oleh karena itu pencegahan infeksi oleh virus dalam air dibutuhkan apakah dengan memisahkannya atau membunuhnya. Proses-proses koagulasi, sedimentasi dan filtrasi dapat menghilangkan partikel virus dalam air sebanyak 99 persen. Dalam studi ini, uji dilakukan terhadap contoh air yang telah diinokulasi dengan konsentrasi virus yang tinggi ($>10^5/1$). Apakah hal ini juga terjadi pada konsentrasi virus yang rendah, belum diketahui. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa virus yang diadsorpsi oleh koagulan tetap mempertahankan aktivitasnya.

Klorin dan ozon merupakan desinfektan yang baik untuk virus. Ozon lebih efektif daripada klorin, tetapi waktu kontak yang diperlukan relatif lama.

D. PROTOZOA

Protozoa adalah kelompok organisme yang umumnya motil, bersel tunggal dan tidak mempunyai dinding sel. Kebanyakan protozoa adalah predator, seringkali memakan bakteri. Protozoa juga dicirikan oleh sel eukariotik, yang mempunyai membran internal dan lebih kompleks daripada sel prokariotik bakteri. Protozoa yang ditemukan dalam sistem penanganan aerobik antara lain flagelata, siliata yang bebas bergerak, dan siliata batang yang terikat pada partikel padatan dengan cabang-cabang.

Protozoa penting dalam penanganan limbah karena organisme ini akan memakan bakteri, sehingga jumlah sel bakteri yang ada tidak berlebihan. Di samping itu, protozoa akan mengurangi bahan organik yang tidak dimetabolisme dalam sistem penanganan dan membantu menghasilkan effluen dengan mutu yang lebih tinggi dan lebih jernih. Protozoa yang sering ditemukan dalam proses penanganan air adalah vortisela.

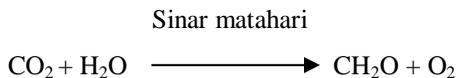
Masalah kesehatan masyarakat yang utama dengan adanya protozoa adalah disentri amuba. Penyakit ini disebabkan oleh organisme *Entamoeba histolytica*.

Unit lumpur aktif yang bebas dari protozoa menghasilkan efluen yang sangat keruh. Kekeruhan ini disebabkan oleh adanya sejumlah besar bakteri yang terdispersi. Sebagai hasilnya, BOD dan padatan yang tidak terendap dari efluen tinggi. Penambahan protozoa siliata akan meningkatkan mutu efluen dan menurunkan jumlah bakteri.

Protozoa umumnya membutuhkan nutrisi yang lebih kompleks daripada bakteri dan kapang. Protozoa ditemukan dalam penanganan anaerobik padatan selokan dan dalam sistem penanganan limbah hewan, terutama limbah ruminansia. Peranan protozoa dalam sistem ini tidak diketahui, tetapi diperkirakan sama seperti pada sistem aerobik yaitu memetabolisme bahan partikulat dan bakteri, dan penjernihan efluen akhir.

E. GANGGANG (ALGAE)

Ganggang adalah organisme autotrof fotosintetik. Komposisi sel ganggang dapat dinyatakan dengan $C_{106}H_{108}O_{45}N_{16}P$. Oleh karena kebutuhan nutrisi dari jenis ganggang berbeda, maka rumus ini merupakan rata-rata empirik. Ganggang memperoleh energi dari sinar matahari dan menggunakan bahan anorganik seperti karbon dioksida, amonia atau nitrit, dan fosfat dalam sintesis sel-sel tambahan. Dalam fotosintesis akan terbentuk molekul oksigen, seperti terlihat pada persamaan di bawah ini:



Oksigen dilepaskan ke dalam lingkungan dan digunakan oleh bakteri pada waktu metabolisme bahan-bahan organik. Rancangan dan pengelolaan kolam oksidasi berusaha untuk menyetimbangkan kedua kelompok organisme.

Ganggang memperoleh karbon dioksida dari sumber-sumber berikut ini, dalam air atau limbah cair: (a) absorpsi dari udara, (b) respirasi aerobik dan anaerobik dari organisme heterotrofik, dan (c) alkalinitas bikarbonat. Ketika karbon dioksida dikeluarkan dari air limbah oleh ganggang yang tumbuh, pH akan naik. Nilai pH setinggi 10 tidak umum dalam sistem ganggang yang

aktif seperti kolam oksidasi dan unit serupa. Walaupun pertumbuhan ganggang dapat dikendalikan dengan membatasi karbon, karbon dari alkalinitas dan produksi bakteri akan menyediakan sejumlah karbon yang dapat digunakan untuk pertumbuhan ganggang. Karbon dalam sistem alamiah jarang membatasi pertumbuhan ganggang.

Ganggang akan berkembang banyak bila sinar matahari cukup menembus cairan. Ganggang tidak akan tumbuh baik bila cairan sangat keruh seperti pada unit lumpur aktif dan lagun teraerasi, di mana sinar matahari tidak dapat masuk, atau bila warna cairan sangat gelap. Bila tidak ada sinar matahari, maka fotosintesis akan terhenti dan respirasi endogenes dari ganggang akan berlangsung dengan cara yang sama seperti pada bakteri. Dengan demikian ganggang memberikan tambahan kebutuhan oksigen pada unit yang digunakan. Jenis ganggang yang paling penting dalam air dan penanganan air limbah adalah ganggang biru-hijau dan ganggang hijau.

1. Ganggang biru-hijau

Kelompok ini agak berbeda dari jenis ganggang lain karena selnya prokariotik. Walaupun fotosintesis merupakan proses konversi energi yang paling utama, sebagian ganggang biru-hijau dapat memecah bahan organik kompleks. Fiksasi nitrogen diamati terjadi pada beberapa jenis ganggang biru-hijau. Ganggang biru-hijau selalu mempunyai sel-sel yang tidak khusus, misalnya setiap sel tidak tergantung pada sel lain untuk metabolisme. Jenis tertentu tumbuh dalam bentuk filamen dan sering menimbulkan masalah dalam danau. Di antaranya adalah *Nostoc* dan *Oscillatoria*.

Dua kelompok ganggang biru-hijau, *Microcystis* dan *Anabaena*, menghasilkan toksin yang dapat menimbulkan penyakit atau kematian pada burung dan mamalia yang meminum air. Ekskresi dari ganggang biru-hijau sering menimbulkan masalah rasa dan bau air. Oksidasi senyawa-senyawa penyebab bau, akan tetapi dengan klorin atau ozon dapat mutu air dapat diperbaiki. Ada pun dengan tambahan penanganan dengan karbon aktif biasanya akan menghasilkan produk yang dapat dikonsumsi.

2. Ganggang hijau

Ganggang hijau seperti kelompok lain kecuali biru-hijau, dicirikan oleh sel eukariotik. Ganggang hijau ini mempunyai dinding sel yang kaku seperti pada tanaman dan sangat fotoautotrof. Dua ganggang hijau yang uniseluler, *Chlorella* dan *Senodesmous*, umum terdapat sebagai jenis pradominan dalam kolam oksidasi limbah.

F. ROTIFER

Organisme multiseluler yang dapat memecah makanan padat, seperti rotifer, ditemukan dalam sistem yang mengandung oksidasi terlarut yang sangat stabil setiap saat. Rotifer memecah partikel padatan yang sebagian dari partikel tersebut tidak dapat digunakan oleh protozoa dan juga membantu dalam menghasilkan efluen yang tidak keruh.

G. CRUSTACEA

Crustacea adalah organisme multiseluler dengan kulit yang keras. Organisme ini tumbuh dalam sistem yang cukup stabil, yang menggunakan organisme yang lebih kecil sebagai sumber makanan utamanya. Dengan melakukan hal ini, maka organisme tersebut membantu menghasilkan efluen jernih yang merupakan indikasi efluen bermutu tinggi yang dihasilkan dari suatu teknik penanganan limbah cair secara aerobik.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Mengapa sel bakteri mampu bertahan tanpa dinding sel tetapi tidak dapat hidup tanpa membran sitoplasmik yang utuh? Jelaskan!
- 2) Sebutkan faktor penentu dominasi bakteri atau fungi pada tempat yang sama.

Petunjuk Jawaban Latihan

Untuk menjawab soal-soal dalam latihan ini, Anda harus mempelajari kembali materi Kegiatan Belajar 2.



RANGKUMAN

Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme terpenting dalam sistem penanganan air limbah dan kebanyakan bersifat kemoheterotrofik. Beberapa spesies bersifat kemoautotrof dan sebagian yang lain fotosintetik. Bagian reaktif dari sel bakteri adalah membran sitoplasmik.

Mekanisme transpor dari sebagian besar molekul yang melalui membran diduga disebabkan karena reaksi-reaksi dengan sistem enzim spesifik yang disebut permease. Lapisan lendir yang dikeluarkan oleh bakteri diduga berfungsi sebagai pengikat untuk partikel-partikel flok bakteri. Komposisi bakteri tidak konstan dan bervariasi tergantung tingkat pertumbuhan dan substrat utama yang digunakan. Karakteristik yang berguna dari sebagian bakteri adalah kemampuannya untuk menggumpal. Flokulasi seperti ini akan memisahkan padatan mikro dalam unit pemisahan padatan dan membantu dalam menghasilkan efluen yang bermutu baik.

Fungi adalah mikroorganisme nonfotosintesis, bersel jamak, aerobik, bercabang, berfilamen, dan memiliki kemampuan memetabolisme makanan terlarut. Fungi tidak aktif dalam sistem anaerobik. Kebanyakan fungi tumbuh baik pada pH 4 hingga 5, yang dalam kondisi ini bakteri sulit berkompetisi. Sifat membentuk filamen dari fungi membuat organisme ini kurang diinginkan dalam unit penanganan limbah secara biologik, karena tidak dapat mengendap dengan baik.

Virus berada di antara benda-benda hidup dan tak hidup. Walaupun konsentrasi virus dalam air buangan hanya 1 sampai 2/ml, akan tetapi mengingat satu viron tunggal dapat menyebabkan infeksi, maka konsentrasi yang rendah belum menjamin keamanan. Klorin dan ozon merupakan desinfektan yang baik untuk virus. Ozon lebih efektif daripada klorin, tetapi waktu kontak yang diperlukan relatif lama.

Protozoa adalah kelompok organisme yang umumnya motil, bersel tunggal dan tidak mempunyai dinding sel. Protozoa penting dalam penanganan limbah karena organisme ini akan memakan bakteri. Protozoa yang sering ditemukan dalam proses penanganan air adalah vortisela. Penambahan protozoa siliata akan meningkatkan mutu efluen dan menurunkan jumlah bakteri.

Ganggang adalah organisme autotrof fotosintetik. Jenis ganggang yang paling penting dalam air dan penanganan air limbah adalah ganggang biru-hijau dan ganggang hijau.

Rotifer memecah partikel padatan yang sebagian dari partikel tersebut tidak dapat digunakan oleh protozoa dan juga membantu dalam menghasilkan efluen yang tidak keruh. Ada pun Crustacea adalah organisme multiseluler dengan kulit yang keras yang dapat membantu menghasilkan efluen jernih.

TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Pertumbuhan fungi terhambat pada limbah dengan kondisi
 - A. nitrogen rendah
 - B. memiliki pH tinggi
 - C. berkadar air rendah
 - D. sistem pengolahan limbah bersifat aerobik

- 2) Alasan bahwa fungi mampu berkompetisi lebih baik dibandingkan dengan bakteri dalam limbah yang mempunyai kadar nitrogen yang rendah adalah sel-sel fungi
 - A. jamak
 - B. tunggal
 - C. mengandung nitrogen lebih sedikit daripada bakteri
 - D. mengandung nitrogen lebih banyak daripada bakteri

- 3) Salah satu jawaban berikut ini adalah BUKAN karakteristik ganggang biru-hijau, yaitu
 - A. mampu berfotosintesis
 - B. memiliki sel eukariotik
 - C. mampu melakukan fiksasi nitrogen
 - D. *nostoc* adalah ganggang biru-hijau yang tumbuh dalam bentuk filamen

- 4) Salah satu karakteristik ganggang biru-hijau di bawah ini ada yang TIDAK benar, yaitu
 - A. eukariotik
 - B. fotoautotrof
 - C. memiliki dinding sel yang kaku
 - D. *chlorella* adalah ganggang hijau multiseluler

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

- 1) A
- 2) C
- 3) B
- 4) B

Tes Formatif 2

- 1) B
- 2) C
- 3) A
- 4) D

Daftar Pustaka

- Barnes, D. and F. Wilson. (1983). *Chemistry and Unit Operations in Water Treatment*. London and New York: Applied Science Publishers.
- Guthrie, R.K. (1980). *Food Sanitation*. Westport, Connecticut: The AVI Publ. Co., Inc.
- Loehr, R.C. (1977). *Pollution Control for Agriculture*. New York: Academic Press, Inc.
- Longree, K. (1980). *Quantity Food Sanitation*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Middlebrooks, E.J. (1979). *Industrial Pollution Control*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Schroeder, E.D. (1977). *Swater and Wastewater Treatment*. New York: McGraw Hill, Inc.