

Tinjauan Umum Mikrobiologi Lingkungan

Drs. Agus Irianto, M.Sc.



PENDAHULUAN

TINJAUAN UMUM MIKROBIOLOGI LINGKUNGAN

Modul 1 ini akan menjelaskan tinjauan umum mikrobiologi lingkungan, yang ditekankan pada sejarah, ruang lingkup, dan kelompok mikroba. Pada bahasan sejarah dan ruang lingkup mikrobiologi, akan dijelaskan secara lengkap awal perkembangan mikrobiologi lingkungan dan ruang lingkungannya. Sedang pada bahasan kelompok mikroba, akan diwakili oleh Virus, Prokariota, Cendawan, Algae, dan Protozoa.

Setelah mempelajari modul ini secara umum Anda diharapkan dapat menjelaskan tinjauan umum mikrobiologi lingkungan. Dan secara khusus Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan sejarah awal perkembangan mikrobiologi lingkungan
2. menerangkan ruang lingkup mikrobiologi
3. menjelaskan mikroba yang termasuk kelompok virus, prokariota, cendawan, algae, dan protozoa.

KEGIATAN BELAJAR 1

Sejarah dan Ruang Lingkup

A. SEJARAH

Sejak awal sejarah, manusia telah mengetahui faktor-faktor yang terlibat dalam masalah penyakit. Beberapa bukti menunjukkan hal tersebut, antara lain di India sekitar tahun 2800 SM masyarakat berbudaya, Kepulauan Orkney (Scotland), Pulau Crete dan Lembah Eufkrat telah membuat saluran pembuangan limbah cair rumah tangga. Di Roma pada awal abad ke-4 M telah didirikan jamban umum di pusat-pusat aktivitas penduduk. Adapun kertas toilet (tisu) sudah digunakan di Cina pada abad ke-6 M dan di Eropa orang menggunakan jerami atau daun-daun kering untuk hal yang sama.

Kebudayaan Mohenjo-Daro dan Harappa di Lembah Indus telah mengenal saluran air dari tanah liat sejak sekitar 2700 SM, sedangkan pipa berbahan logam digunakan di Mesir pada sekitar 2500 SM dan istana Knossos di Crete sekitar 2000 SM. Sejak permulaan tahun Masehi, Roma telah membangun tandon air untuk keperluan sumber air bersih dan distribusinya dilakukan dengan pipa-pipa berbahan timah. Pemahaman tentang penularan penyakit ternyata tidak mendapat perhatian sepenuhnya. Hingga hari ini terbukti bahwa sekitar 15 juta anak-anak mati setiap tahun karena penyakit infeksi yang sebenarnya dapat dicegah dengan perbaikan sanitasi, imunisasi, dan penanganan medik yang sederhana.

Ukuran mikroba yang sangat kecil menjadi kendala manusia untuk mengenalinya. Sebelum ditemukannya mikroskop mungkin manusia telah mengetahui cendawan atau koloni bakteri yang tumbuh pada bahan makanan, tetapi pemahamannya masih sangat terbatas. Pada tahun 1665 **Robert Hooke** menggunakan alat bantu yang mampu melihat struktur sel dan cendawan, tetapi masih belum mampu melihat sel bakteri.

Bidang mikrobiologi lingkungan sendiri dimulai dari hasil pengamatan **Anthony van Leeuwenhoek** yang dipublikasikan pada tahun 1676 melalui surat beserta gambar-gambar yang dikirim ke Royal Society di London. Lensa Anthony yang merupakan mikroskop sederhana terdiri dari lensa tunggal yang mampu melihat hingga perbesaran ~300-500. Dengan perbesaran tersebut memungkinkan melihat algae, protozoa, dan bakteri

yang dikatakan sebagai "animalcula" atau hewan kecil" yang dapat hidup dan berkembang biak pada air hujan, air sumur, air laut, dan salju yang meleleh.

Meskipun sudah ditemukan mikroskop, tetapi pemahaman tentang hubungan mikroba dengan penyakit tetap tertutup hingga 200 tahun kemudian. Berbagai pengamatan Leeuwenhoek didasarkan pada pengujian sampel dari lingkungan yang dipelihara pada botol wine, mangkuk atau botol. Wadah pemeliharaan semacam itulah yang kemudian dikenal sebagai lingkungan buatan atau mikrokosmos. Selanjutnya rumusan mikrokosmos berlaku pula bagi fermentor modern dan struktur lingkungan buatan di lingkungan seperti waduk atau lapangan golf.

Terjadinya dan penyebaran penyakit infeksi yang disebabkan oleh sanitasi yang buruk telah disadari oleh **Ignaz Semmelweis**. Ia seorang dokter yang bekerja di rumah sakit bersalin di Wina, Austria. Pada tahun 1841 ia memulai karier untuk menjalankan rumah sakit bersalin, dia melihat bahwa tingkat kematian ibu dan bayi sangat tinggi, serta 18% dari kematian berasal dari infeksi darah oleh *Streptococcus*. Menurutnya seorang dokter ikut berperan dalam terjadinya infeksi. Dengan pernyataannya itu dia dipecat dan terpaksa harus bekerja di tempat lain. Pada tempat yang baru dia menerapkan standar sanitasi yang lebih baik dengan mengharuskan dokter mencuci bersih tangan dengan disinfektan dan berganti baju operasi. Hasilnya menunjukkan tingkat kematian turun sebesar dua per tiga.

Meskipun sudah ditemukan mikroskop dan diketahui adanya organisme yang sangat kecil, paham **Generasi Spontan** atau **Abiogenesis** tetap hadir. Pada tahun 1859, bapak mikrobiologi modern **Louis Pasteur** dengan percobaannya menggunakan tabung gelas leher angsa yang menghubungkan udara luar dengan bejana berisi kaldu yang sudah direbus, menunjukkan tidak ada pertumbuhan mikroba meskipun diinkubasi beberapa bulan. Hasil penelitian ini mematahkan paham Generasi Spontan untuk selama-lamanya. Masalah baru muncul dengan terjadinya pertumbuhan mikroba meskipun kaldu sudah direbus. Belakangan diketahui bahwa penyebabnya adalah spora yang mampu bertahan pada suhu tinggi.

Fanny Angelina Eilshemius lahir pada tahun 1850 dari keluarga imigran Belanda. Pada tahun 1874 menikah dengan dokter Jerman, **Walther Hesse** yang bekerja pada laboratorium Koch pada tahun 1881. Hesse mempelajari bakteri yang berhubungan dengan kesehatan masyarakat dan metabolisme bakteri dibantu oleh istrinya. Ketika itu media untuk pertumbuhan bakteri menggunakan gelatin sebagai bahan pematat, kesulitan

timbul ketika Hesse ingin mengetahui jumlah mikroba udara pada saat musim panas karena gelatin meleleh. Eilshemius mendapatkan informasi dari tetangganya, seorang migran dari Jawa saat di New York, bahwa mereka membuat puding dari agar yang tidak meleleh meskipun udara sangat panas. Eilshemius mengusulkan untuk mencoba menggunakan agar sebagai agen pematid dan ternyata hasilnya sangat memuaskan. Agar menjadi pengganti gelatin yang menakjubkan karena beberapa nilai komparatif yang dimiliki, yaitu:

- a. tidak beracun;
- b. meleleh pada suhu 100° C dan membeku pada suhu sekitar 45° C;
- c. tidak bersifat toksik pada organisme lain;
- d. stabil pada suhu sterilisasi;
- e. secara fisiologis cukup tahan karena jarang ada mikroba mampu menghidrolisis agar.

Dengan ditemukannya agar sebagai agen pematid media pertumbuhan mikroba, maka perkembangan mikrobiologi semakin pesat. Pada era tahun 70-an mikrobiologi lingkungan mulai diperkenalkan dengan fokus perhatian pada kesehatan masyarakat dan lingkungan. Hal ini terus berkembang hingga mencakup bidang yang luas dan berkaitan dengan bidang ilmu lainnya. Adapun yang paling erat kaitannya yaitu ekologi mikroba. Meskipun erat kaitannya, tetapi kedua bidang ilmu tersebut memiliki sudut pandang dan tujuan yang berbeda. Perbedaan utama antara ekologi mikroba dan mikrobiologi lingkungan yaitu bahwa mikrobiologi lingkungan merupakan ilmu terapan yang mengacu pada kenyataan bagaimana kita memahami manfaat kehadiran mikroba di alam. Berdasarkan hal tersebut secara spesifik Hurst *et al.* (1997) mendefinisikan bahwa **mikrobiologi lingkungan** merupakan studi tentang keberadaan mikroba pada lingkungan alami maupun buatan. Adapun ekologi mikroba yaitu ilmu yang mempelajari interrelasi atau interaksi antara mikroba dengan lingkungannya baik lingkungan biotik maupun abiotik. Menurut Maier *et al.* (1999) mikrobiologi lingkungan didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari pengaruh penerapan mikroba pada lingkungan, aktivitas, kesehatan, dan kesejahteraan manusia. Dengan demikian mikrobiologi lingkungan harus dapat menerima keterlibatan manusia dalam mengatur dan memanipulasi aktivitas mikroba.

B. RUANG LINGKUP

Pada awal perkembangannya mikrobiologi lingkungan, berfokus pada kualitas air dan ancaman kehadiran mikroba patogen, dengan demikian tinjauan utamanya adalah dalam konteks perlindungan kesehatan masyarakat. Dengan perkembangan yang terjadi di berbagai aspek kehidupan manusia, maka mikrobiologi lingkungan berkembang antara lain, meliputi mikrobiologi tanah, air, dan udara, bioremediasi, kualitas air, kontrol penyakit dan kesehatan, keamanan pangan serta industri.

Ruang lingkup mikrobiologi lingkungan ditunjukkan dalam Tabel 1.1 berikut:

Tabel 1.1.
Ruang Lingkup Mikrobiologi Lingkungan

Lingkup	Topik
Aeromikrobiologi (mikrobiologi udara)	Isolasi dan deteksi patogen atau mikroba lain di udara, gerakan mikroba di udara
Agrikultur, mikrobiologi tanah	Kontrol biologis, pengikatan nitrogen, siklus nutrisi
Biogeokimia	Siklus karbon dan mineral, kontrol air limbah pertambangan, kontrol pelepasan nitrogen terikat
Bioremediasi	Degradasi kontaminan organik, immobilisasi atau pembuangan kontaminan anorganik pada tanah maupun perairan
Bioteknologi	Deteksi patogen atau mikroba di lingkungan, deteksi aktivitas mikroba di lingkungan,
Kualitas pangan	rekayasa genetika
Produksi bahan	Deteksi patogen dan usaha pembebasan bahan makanan dari patogen
Pengambilan bahan	Produksi alkohol, produksi protein sel tunggal Penambangan minyak dan mineral dengan bantuan mikroba
Penanganan limbah	Degradasi limbah, reduksi patogen
Kualitas air	Penghilangan kontaminan organik dan anorganik, deteksi patogen, pengurangan jumlah patogen.

Sumber: Maier *et al.*, 1999

Mikroba dijumpai pada keseluruhan habitat di planet bumi termasuk pada lingkungan yang ekstrem seperti mata air panas atau perairan Antartika yang sangat dingin, perairan Laut Mati yang memiliki kadar garam sangat tinggi atau pada air limbah pertambangan yang memiliki nilai pH sangat rendah. Kehadiran mikroba di lingkungan merupakan suatu proses yang melibatkan suksesi organisme. Mikroba berinteraksi kimiawi dengan lingkungan fisiknya, dengan perannya itu maka mikroba merupakan komponen yang sangat menentukan dalam siklus biogeokimiawi.

Pemahaman terhadap peran mikroba memungkinkan manusia mengambil manfaatnya antara lain berupa eksplorasi senyawa bermanfaat (senyawa bioaktif) seperti antibiotik dan enzim, serta peran menguntungkan lainnya seperti pelindihan logam secara biologis (*bioleaching*), dekomposisi limbah, dan memacu produksi pertanian. Bertitik tolak dari hal tersebut memungkinkan manusia memanipulasi aktivitas mikroba baik di lingkungan alami maupun buatan, dan menjadi landasan utama bioteknologi.



LATIHAN

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

- 1) Mengapa agar dapat menggantikan fungsi gelatin pada media pertumbuhan bakteri?
- 2) Jelaskan perbedaan sudut pandang antara ekologi mikroba dengan mikrobiologi lingkungan!
- 3) Sebutkan 5 macam ruang lingkup dari mikrobiologi lingkungan!

Petunjuk Jawaban Latihan

Untuk dapat mengerjakan latihan soal tersebut, pelajari kembali materi tentang:

- 1) beberapa kelebihan yang dimiliki agar
- 2) pendapat Hurst *et.al* (1997)
- 3) Tabel 1.1.

**RANGKUMAN**

Perhatian manusia tentang kesehatan sudah disadari sejak lama. Usaha ke arah hidup sehat telah dilakukan antara lain dengan distribusi air minum melalui pipa-pipa serta pembuangan limbah yang teratur. Penemuan oleh Anthony van Leeuwenhoek serta perintis mikrobiologi lainnya telah membawa pemahaman manusia yang lebih baik mengenai mikroba. Perhatian yang besar pada masalah kesehatan merupakan awal perkembangan mikrobiologi lingkungan.

**TES FORMATIF 1**

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Pelopor sanitasi lingkungan yaitu
 - A. Louis Pasteur
 - B. Ignaz Semmelweis
 - C. Anthony van Leeuwenhoek
 - D. Walther Hesse

- 2) Saluran air sebagai sarana sanitasi tertua dikenal di
 - A. Jawa
 - B. Pulau Crete
 - C. Mesir
 - D. Peru

- 3) Agar merupakan alternatif pengganti
 - A. Silika
 - B. Nutrien
 - C. Gelatin
 - D. Karbohidrat

- 4) Yang mengungkapkan pendapat tentang perbedaan antara ekologi mikroba dengan mikrobiologi lingkungan, yaitu
 - A. Walter Hesse
 - B. Louis Pasteur
 - C. Leeuwenhoek
 - D. Hurst

- 5) Topik “rekayasa genetika” merupakan ruang lingkup mikrobiologi bidang
- A. Bioteknologi
 - B. Bioremediasi
 - C. Biogeokimia
 - D. Agrikultur

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

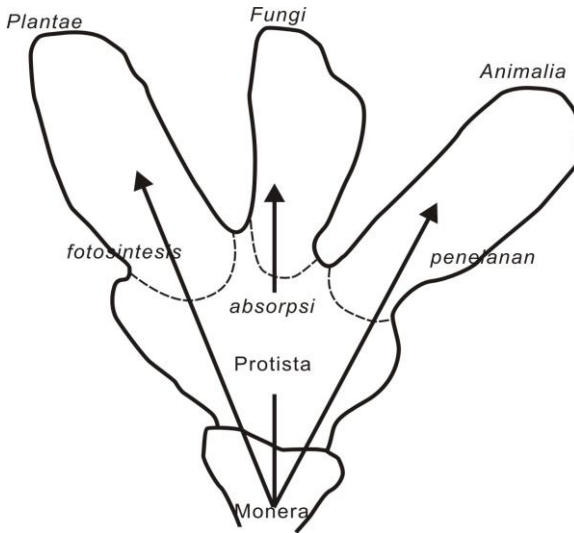
Kelompok - kelompok Mikroba

Mikroorganisme atau mikroba didefinisikan sebagai organisme yang berukuran sangat kecil, sehingga hanya dapat dilihat dengan bantuan mikroskop. Kadangkala mikroba juga didefinisikan sebagai organisme bersel tunggal yang termasuk dalam mikroba, meliputi: protozoa, algae, cendawan, bakteri, dan virus. Namun demikian untuk virus ada suatu pengecualian, hal ini disebabkan virus bukanlah sel. Beberapa mikroba yaitu algae dan cendawan mungkin membentuk suatu agregat sel sehingga mudah dilihat dengan mata kepala biasa, akan tetapi tetap berbeda dengan sel organisme tingkat tinggi mengingat belum terdiferensiasi dalam jaringan-jaringan.

A. KLASIFIKASI ORGANISME

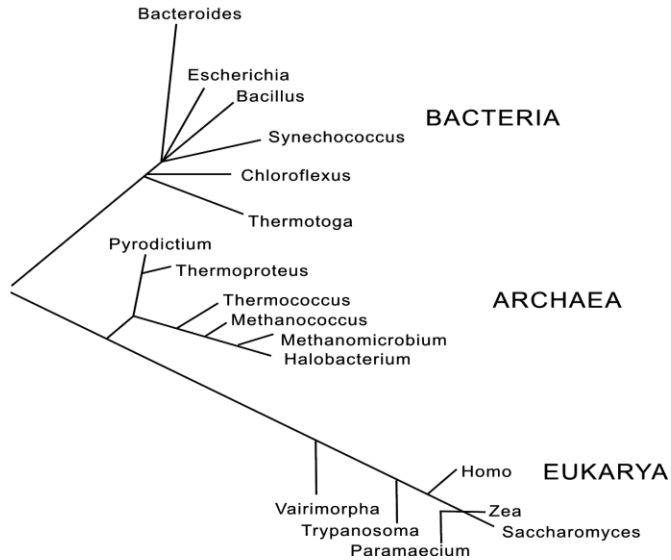
Awalnya organisme dikelompokkan menurut rintisan **Carl Linnaeus** pada tahun 1759. Untuk menggambarkan hubungan evolusinya, **Ernst Heinrich Haeckel** (1866) mengusulkan pengelompokan mikroba dalam 3 kelompok besar, yaitu hewan, tumbuhan, dan protista. Kelompok protista dibedakan dari tumbuhan dan hewan didasarkan atas belum adanya diferensiasi sel dan jaringan. Pada klasifikasi ini semua mikroba dikelompokkan sebagai protista.

Pada perkembangan klasifikasi selanjutnya, para ahli menggunakan sistem klasifikasi 5 kingdom menurut **Whittaker** (1969). Menurut Whittaker, perkembangan evolusi mengikuti 3 model pemenuhan nutrisi, yaitu: fotosintesis tumbuhan, absorptif nutrisi yaitu cendawan, serta penelanan (ingestif) yang meliputi kelompok hewan. Pembagian itu juga didasarkan pada tiga tingkatan organisasi, yaitu prokaryotik (Monera), eukaryotik uniseluler (Protista), serta eukaryotik multiseluler dan multinukleat (Fungi, Animalia dan Plantae). Monera sendiri meliputi semua bakteri termasuk *blue-green algae* (*cyanobacteria*, sianobakteri) (Gambar 1.1.). Sistem yang dikembangkan Whittaker mengasumsikan bahwa kingdom Monera merupakan kelompok organisme yang paling primitif dan selanjutnya mengalami proses evolusioner menjadi Protista dan seterusnya hingga bentuk evolusi mutakhir berupa cendawan, tumbuhan, dan hewan.



Gambar 1.1.
Klasifikasi Organisme Menurut Whittaker

Sistem klasifikasi terbaru diperkenalkan oleh **Carl Woese** yang membagi organisme dalam 3 kingdom utama, yaitu Archaea (Archaeobacteria), Eubacteria atau Bacteria (Ind.: bakteri), dan Eucarya (Eukarya). Archaea dan Bacteria merupakan jasad prokaryotik yang memiliki organisasi sel yang sederhana, tanpa nukleus yang sebenarnya, dan secara struktural jelas berbeda dari sel eukaryota. Pembagian kingdom ini didasarkan pada penemuan bahwa Archaea secara mendasar berbeda dengan organisme lainnya. Pembagian kingdom ini dikembangkan berdasarkan biologi molekular dengan melihat makromolekul organisme terutama ribosomal RNA. Pada tingkatan genetis molekuler Woese mampu menunjukkan bahwa antara Archaea, Bacteria, dan Eukarya memiliki perbedaan yang besar (Gambar 1.2).



Gambar 1.2.
Klasifikasi Organisme Menurut Woese

Beberapa mikroba tidak termasuk klasifikasi di atas karena merupakan jasad aseluler. Meskipun masih banyak polemik, orang mencatat beberapa jasad aseluler yang digolongkan sebagai mikroba, yaitu virus, viroid dan prion.

Prion merupakan molekul protein spesifik yang infeksiif. Prion memiliki informasi yang mengkode replikasinya, hal ini sangat berbeda dengan konsep sebelumnya yang menunjukkan bahwa informasi genetik terdapat pada asam nukleat baik DNA maupun RNA. Salah satu prion yang terkenal adalah prion penyebab penyakit sapi gila (**cow mad disease** atau **bovine spongiform encephalopathy**, BSE) yang diduga berkaitan dengan varian baru CJD (Creutz-Jakob disease) pada manusia.

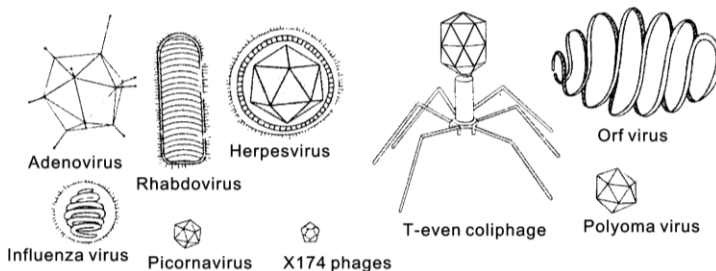
Adapun viroid merupakan jasad yang terdiri dari RNA saja. Viroid merupakan molekul sederhana yang mengandung materi pengode reproduksinya. Genome RNA-nya kecil dan dalam sel inang viroid mampu memulai replikasi dirinya. Replikasi viroid kadangkala ditunjukkan sebagai gejala-gejala (**symptom**) penyakit dalam hewan inangnya. Beberapa penyakit yang disebabkan viroid antara lain adalah penyakit umbi kentang dan eksokortis pada tanaman jeruk.

B. VIRUS

Virus merupakan mikroba aseluler dan parasit obligat intraselluler yang hanya dapat dilihat dengan bantuan elektron mikroskop. Ukuran virus bervariasi dari 20-200 nm. Untuk dapat bertahan di lingkungan virus harus mampu berpindah dari inang satu ke lainnya, menginfeksi dan mereplikasi pada inang yang sesuai.

Suatu partikel virus didefinisikan sebagai struktur yang terlibat dalam transfer asam nukleat dari satu sel ke sel lainnya. Asam nukleat yang dijumpai pada partikel virus dapat berupa DNA atau RNA, dengan benang tunggal atau ganda, linear atau bersegmen. Pada banyak kasus asam nukleat mungkin sirkuler.

Partikel virus yang paling sederhana terdiri dari sampul protein yang membungkus asam nukleat. Pada struktur yang lebih kompleks, bungkus protein mengandung glikoprotein. Struktur virus lengkap disebut sebagai **virion**. Virion mungkin dapat berupa suatu sampul protein yang memiliki **peplomer-peplomer** (perluasan). Sampul protein disekeliling asam nukleat disebut sebagai **kapsid**, yang tersusun atas unit-unit morfologi yang disebut **kapsomer**. Tipe kapsomer tergantung pada keseluruhan bentuk kapsid. Pada kapsid yang ikosahedral, kapsid dapat berupa heksamer atau pentamer. Kapsomer sendiri tersusun atas unit-unit yang disebut protomer. Gambaran umum virus ditunjukkan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3. Gambar skematis virus

Klasifikasi virus didasarkan pada morfologi, genom, sifat-sifat fisikokimia dan fisik, sifat antigenik, dan sifat-sifat biologis. **Karakter genom** yang dilihat antara lain: ukuran, bentuk, ada tidaknya peplomer dan sifatnya, ada tidaknya sampul, simetri, dan struktur kapsid. **Sifat-sifat fisikokimia** dan **fisik** meliputi antara lain: berat massa virion, koefisien

sedimentasi virion, stabilitas terhadap pH, stabilitas terhadap suhu, stabilitas terhadap kation (Mg^{2+} , Mn^{2+}), densitas pengapungan virion (dalam CsCl, sukrosa), stabilitas terhadap pelarut, stabilitas terhadap deterjen, stabilitas terhadap iradiasi, dan protein. **Sifat antigenik** yang dilihat misalnya sifat serologiknya. Adapun **sifat-sifat biologisnya** meliputi: inang, cara transmisi, hubungan dengan vektor, distribusi geografis, dan patogenisitas .

Kehadiran virus merugikan baik bagi hewan, manusia, dan tumbuhan. Dari sisi kebutuhan manusia, pengembangan virus dapat diarahkan untuk kontrol biologi, misalnya dalam pengendalian hama penggerek daun kelapa (kwangwung). Di samping virus organisme tingkat tinggi, virus dapat pula memiliki inang spesifik berupa bakteri sehingga dikenal sebagai bakteriofag. Bakteriofag dapat sangat merugikan bagi industri yang menggunakan peran bakteri misalnya bakteriofag dapat menginfeksi *Lactobacillus* pada industri asam laktat.

Berdasarkan inangnya, secara umum virus dibedakan dalam 3 kelompok, yaitu virus mikroba, virus hewan, dan virus tumbuhan.

1. Virus Mikroba

Virus yang berkembang biak dalam sel mikroba dibedakan berdasarkan mikroba inangnya, yaitu: bakteriofag (virus yang menginfeksi bakteri), sianofag (*cyanophage*, virus yang menginfeksi sianobakteri), mikovirus (*mycovirus*, virus yang menginfeksi cendawan), fikovirus (*phycovirus*, virus yang menginfeksi algae), dan virus protozoa. Kelompok virus tersebut sebagian besar didefinisikan dan dibedakan berdasarkan pada sifat molekulernya. Virus mikroba memiliki spesifikasi yang besar terhadap inangnya, hal ini kemungkinan berkaitan dengan reseptor khusus yang dimiliki inang.

Bakteriofag umumnya dinamakan berdasarkan bakteri yang diinfeksi, misalnya colifag merupakan bakteriofag yang menginfeksi *Escherichia coli*. Bakteriofag dapat dikelompokkan menjadi 6 kelompok berdasarkan sifat morfologis yang dimilikinya yaitu:

1. Kepala heksagonal, ekor kaku dengan selubung yang kontraktile serta memiliki serabut ekor.
2. Kepala heksagonal tanpa selubung kontraktile, ekornya kaku dan dengan atau tanpa serabut ekor.

3. Kepala heksagonal dan memiliki ekor pendek tanpa seludang kontraktil, dengan atau tanpa serabut ekor.
4. Kepala dengan kopsomer-kopsomer besar tanpa memiliki ekor.
5. Kepala dengan kopsomer-kopsomer kecil tanpa memiliki ekor.
6. Bakteriofag berbentuk filamen.

Beberapa virus hewan dan tumbuhan memiliki ciri seperti kelompok 4 dan 5, sedang kelompok 6 (filamen) dapat dijumpai pula pada virus tumbuhan.

2. Virus Hewan

Secara umum virus hewan hanya mencakup dari hewan invertebrata, sedangkan yang menginfeksi invertebrata dikelompokkan secara terpisah. Secara umum virus hewan dan tumbuhan memiliki 4 kelompok berdasarkan ciri morfologisnya, yaitu:

1. Ikosahedral, misalnya dijumpai pada virus polio dan adenovirus.
2. Helikal, antara lain dijumpai pada virus rabies, dan umum dijumpai pada virus tumbuhan.
3. Bersampul, nukleokapsid dapat berbentuk ikosahedral atau helikal dan bersampul, misalnya dijumpai pada virus influenza.
4. Kompleks, virus kelompok ini memiliki struktur yang rumit, misalnya dijumpai pada virus stomatitis vesikular dan virus cacar.

Kelompok virus hewan dan penyakit yang disebabkan ditunjukkan dalam Tabel 1.2 berikut:

Tabel 1.2.
Kelompok Virus Hewan dan Penyakit yang Disebabkannya

Familia	Sifat	Contoh	Penyakit yang ditimbulkan
Poxviridae	DNA benang ganda, partikel bentuk batu bata, ukuran besar	Varola	Virus <i>Smallpox</i>
Hesperiviridae	DNA benang ganda, kapsid bentuk ikosahedron terbungkus sampul, sifat laten di dalam inang	Herpes simplex	Infeksi kelamin
Adenoviridae	DNA benang ganda, ikosahedron dengan struktur serat, tidak bersampul	Adenovirus	Infeksi mata, saluran pernapasan
Papovaviridae	DNA benang ganda, 72 kapsomer dalam kapsid, tanpa sampul	Virus papilloma pada manusia	Berhubungan dengan beberapa jenis kanker

Familia	Sifat	Contoh	Penyakit yang ditimbulkan
Hepadnaviridae	Satu DNA lengkap tanpa benang dengan protein ujung 5', DNA tersusun sirkuler oleh benang tambahan yang tidak lengkap, partikel sampul 42 nm	Virus hepatitis B	Serum hepatitis, serum hepatitis hubungan dengan kanker hepatoseluler
Paramyxoviridae	RNA benang tunggal, dengan sampul seperti berduri	Virus parainfluenza	Infeksi saluran pernapasan
Orthomyxoviridae	Delapan segmen RNA benang tunggal, dengan sampul seperti berduri, nukleokapsid helix	Virus influenza	Influenza
Reoviridae	RNA benang ganda dengan 10–12 segmen, ikosahendron, tanpa sampul	Rotavirus	Diare pada bayi
Picornaviridae	RNA benang tunggal, dengan partikel berbentuk kubus 22-30 nm, tanpa sampul	Virus polio Virus Coxsackie Virus Rhino Virus Hepatitis A	Poliomielitis Miokarditis Demam Hepatitis A
Togaviridae	RNA benang tunggal, partikel bersampul, nukleokapsid ikosahendron	Virus rubella Arbovirus	Rubelosis (German measles) Yellow fever
Rhabdoviridae	RNA benang tunggal, berbentuk peluru, partikel bersampul	Virus rabies	Rabies
Retnoviridae	RNA benang tunggal, partikel bersampul dengan nukleokapsid ikosahedral	Virus limfotrofik T manusia Human immuno deficiency virus (HIV)	Leukemia sel T pada orang dewasa dan limpoma Acquired immune deficiency syndrome (AIDS)

3. Virus Tumbuhan

Sebagaimana dijelaskan di atas virus tumbuhan secara umum terdiri dari 4 kelompok berdasarkan ciri morfologisnya sebagaimana virus hewan dan tipe penyakit yang disebabkan. Nama dari kelompok virus tersebut menunjukkan sifat tumbuhan inang dan simpton penyakit. Beberapa virus tumbuhan utama ditunjukkan pada Tabel 1.3 berikut:

Tabel 1.3
Deskripsi Kelompok Utama Virus Tumbuhan

Virus	Deskripsi
Brome mosaic virus	Kecil, ikosahedral, virus RNA
Virus mosaik kol	DNA benang ganda, reproduksi di dalam sitoplasma
Virus mosaik ketimun	Tanpa sampul (telanjang), ikosahedral, virus RNA
Virus kerdil kuning pada barley	Isometrik kecil, genom RNA
Virus kentang X	Batang lentur, 480-580nm, genom RNA
Virus kentang Y	Lentur, batang, simetri heliks, RNA benang tunggal
Virus mosaik tembakau	Berbentuk batang, simetri heliks, RNA benang tunggal
Virus nekrosis tembakau	RNA isometrik
Tobacco rattle virus	Bentuk batang, disebarkan melalui nematoda, RNA
Tobacco ringspot virus	Polihehedral, disebarkan oleh nematoda, benang RNA positif, genom bersegmen
Tomato bushy stunt virus	Polihehedral, disebarkan oleh nematoda, simetri kubik, tahan terhadap kenaikan suhu dan pelarut organik
Virus mosaik kuning turnip	Ikosahedral, genom RNA, disebarkan oleh serangga
Virus mosaik semangka	Batang lentur, 700-950nm, genom RNA

C. PROKARYOTA

Pada umumnya klasifikasi prokaryota didasarkan pada beberapa sifat antara lain:

1. Pengecatan Gram untuk melihat struktur dinding sel.
2. Persen mol G+C dalam genom.
3. Temperatur pertumbuhan.
4. Kemampuan untuk membentuk spora tahan panas.
5. Aseptor elektron untuk respirasi (jika ada).
6. Kemampuan fotosintetis.
7. Motilitas.
8. Bentuk sel.
9. Kemampuan menggunakan berbagai sumber karbon dan nitrogen.
10. Kebutuhan nutrisi spesifik (misalnya vitamin).

Pada abad 20 Ilmuwan mikrobiologi seperti **Stanier dan Van Niel** menyadari bahwa klasifikasi yang didasarkan pada karakter di atas bukanlah sistem alami, tetapi mereka menyadari bahwa tidak ada pilihan lagi yang lebih memuaskan. Sebagai akibatnya klasifikasi bakteri (tidak termasuk sianobakteri) dikodifikasikan pada **Bergey's Manual of Determinative Bacteriology** (Holt *et al.*, 1994) yang hanya dapat digunakan untuk mengidentifikasi mikroba yang sudah diketahui karakternya, sedang untuk

menempatkan kedudukan filogeninya dengan cara tersebut mengalami kesulitan.

Tabel 1.4. Pengelompokan Bakteri Menurut Bergey's Manual of Determinative Bacteria

No.	Kategori	Kelompok	Contoh mikroba
I	Eubacteria Gram negatif, berdinding sel	1. Spirochete	<i>Treponema</i>
		2. Aerobik/mikroaerofilik, motil, spiral atau vibroid, Gram negatif	<i>Bdellovibrio</i> <i>Azospirillum</i>
		3. Non-motil (jarang motil), gram negatif, lengkung, Gram negatif	<i>Flectobacillus</i> , <i>Cyclobacterium</i>
		4. Aerobik/Mikroaerofilik, bentuk batang atau kokus, Gram negatif	<i>Pseudomonas</i> <i>Rhizobium</i>
		5. Fakultatif anaerob, batang, Gram negatif	<i>Escherichia</i> <i>Enterobacter</i> <i>Butyrivibrio</i>
		6. Aerobik, batang, lurus, melengkung atau spiral, Gram negatif	<i>Fibrobacter</i> <i>Desulfomaculum</i> <i>Desulfovibrio</i> <i>Veillonella</i>
		7. Pereduksi sulfat atau disimilasi sulfat	<i>Chlamydia</i> <i>Thiospirillum</i> <i>Spirulina</i> , <i>Nostoc</i>
		8. Kokus, anaerobik, Gram negatif	<i>Nitrobacter</i>
		9. Rickettsia dan Chlamydia	<i>Caulobacter</i>
		10. Bakteri fototrofik anoksigenik	
		11. Bakteri fototrofik oksigenik	<i>Sphaerotilus</i>
		12. Bakteri khemolitotrofik aerobik	<i>Beggiatoa</i>
		13. Bakteri pembentuk tunas atau memiliki alat tambahan	<i>Myxococcus</i>
		14. Bakteri berseludang	
		15. Bakteri non-fotosintetik, tidak ber'buah', meluncur	
		16. Bakteri ber'buah', meluncur (Myxobacteria)	
II	Eubacteria Gram positif berdinding sel	1. Bentuk koki Gram positif	<i>Leuconostoc</i>
		2. Bentuk batang dan koki Gram positif, membentuk endospora	<i>Bacillus</i>
		3. Bentuk batang Gram positif tidak membentuk spora	<i>Lactobacillus</i> <i>Listeria</i>
		4. Batang Gram positif, tidak teratur, tidak membentuk spora	<i>Actinomyces</i> <i>Arthrobacter</i>
		5. Mycobacteria	<i>Mycobacterium</i>
		6. Actinomycetes	<i>Streptomyces</i>

No.	Kategori	Kelompok	Contoh mikroba
III	Eubacteria tidak berdinding sel	1. Mycoplasma	<i>Mycoplasma</i>
IV	Archaeobacteria	1. Metanogenik 2. Pereduksi sulfa 3. Halofilik ekstrem (Halobacteria) 4. Archae tidak berdinding sel 5. Termofilik ekstrem dan hipertermofilik pemetabolisasi sulfur elemental	

1. Archaeobacteria (Archaea)

Archaea merupakan kelompok bakteri yang berbeda dari prokaryotik lainnya, perbedaannya pada molekul RNA ribosomal 16S-nya, morfologis, dan fisiologis. Membran Archaea berbeda dengan membran bakteri pada umumnya karena mengandung ether yang berangkai dengan lipid dan terikat pada gliserol. Dieter-gliserol dan tetraeter-digliseriol merupakan tipe lipid utama yang dijumpai pada membran sel Archaea. Membran Archaea mengandung lipid-lipid non-polar, adapun dinding selnya tidak mengandung murei. Archaea memiliki kemampuan dalam mengatur ketebalan membran selnya. Dinding sel Archaea mengandung asam muramat dan D-asam amino, dan peptidoglikan. Beberapa spesies yang lain mungkin mengandung pseudopeptidoglikan, polisakarida, glikoprotein atau protein.

Metabolisme Archaea bervariasi, ada yang **khemoorganotrof** dan adapula yang **ototrof**. Secara umum tipe metabolisme yang terdapat dalam Archaea mirip dengan yang ada pada Eubacteria.

Tabel 1.5. Perbedaan antara Archaeobacteria dan Eubacteria

Karakter	Archaeobacteria	Eubacteria
Dinding sel Dijumpai peptidoglikan yang mengandung asam muramat dan asam D-amino	-	+
Lipid membran sitoplasma Asam-asam lemak rantai panjang terikat pada gliserol oleh ikatan ester	-	+
Alkohol rantai panjang bercabang (fitanol) terikat pada gliserol oleh ikatan ester	+	-

Karakter	Archaeobacteria	Eubacteria
Properti yang berhubungan dengan sintesis protein		
Asam amino pertama untuk memulai penyusunan rantai polipeptida baru berupa:		
Metionin	+	-
N-formilmetionin	-	+
Proses translasi sensitif terhadap kerja:		
Toksin difteri	+	-
Kloramfenikol	-	+

Sumber: Pelczar *et al.*, 1986

Salah satu contoh utama dari Archaea adalah kelompok bakteri metanogenik. Kelompok bakteri tersebut mampu membentuk metana melalui reduksi karbondioksida, bersifat anaerob obligat yang menggunakan elektron dari oksidasi hidrogen atau senyawa organik sederhana seperti asetat dan metanol. Bakteri metanogenik mampu mengkonversi substrat berupa CO₂, senyawa-senyawa metil, atau asetat menjadi gas metana. Proses konversi ini digambarkan sebagai suatu tipe respirasi anaerobik. Bakteri metanogenik tidak mampu menggunakan senyawa karbohidrat, protein atau senyawa organik kompleks lainnya. Seringkali kelompok bakteri ini berasosiasi dengan mikroorganisme lain yang berperan dalam menjaga konsentrasi oksigen yang rendah dan menyediakan karbondioksida serta asam-asam lemak. Bentuk asosiasi ini antara lain dijumpai pada rumen. Beberapa contoh bakteri metanogenik, yaitu *Methanobacillus*, *Methanococcus*, dan *Methanosarcina*.

Halobacterium dan *Halococcus* merupakan anggota Archaea yang memiliki kemampuan metabolisme fototrofik untuk mensintesis ATP yang dilakukan oleh bakteri orhodopsin yang merupakan protein membran, dan memiliki sifat halofilik ditunjukkan oleh kemampuannya tumbuh jika tersedia sekurangnya 15% NaCl.

Sulfolobus merupakan Archaea yang berperan dalam siklus sulfur sebagai agen pengoksidasi sulfur. *Sulfolobus* mampu tumbuh secara ototrofik menggunakan sulfur elemental sebagai sumber energi. Pada umumnya *Sulfolobus* adalah termofilik, dengan suhu optimum 70-75⁰ C. Berdasarkan karakternya *Sulfolobus* sering dijumpai pada mata air panas dan lingkungan yang asam.

Archaea hipertermofilik merupakan bagian terbesar dari jasad prokaryotik termofilik yang dikenal. Keseluruhannya memerlukan senyawa sulfur tereduksi untuk metabolisme. Dalam banyak kasus bentuk senyawa sulfur tereduksi digunakan sebagai akseptor elektron untuk melangsungkan respirasi anaerob.

Thermoplasma merupakan prokaryota tanpa dinding sel dan mirip mikoplasma. *Thermoplasma* merupakan jasad asidofilik, aerobik *kemoorganotrof* dan termofilik. Umumnya jasad ini dijumpai pada bekas tambang batubara. Membran selnya mengandung lipopolisakarida yang terdiri dari lipid dengan empat gugus eter, manosa, dan glukosa.

Kelompok fisiologis utama Archaeobacteria, yaitu: termofilik (termasuk termoasidofilik), pereduksi sulfat, matanogenik dan halofilik ekstrem. Kelompok-kelompok fisiologis ini tidak berhubungan dengan kedudukan filogeninya. Pereduksi sulfat merupakan kelompok Archaea yang paling luas sebarannya. Perhatian banyak ditujukan pada kelompok ini mengingat kemampuannya dalam meningkatkan kandungan sulfur pada minyak bumi sehingga saat digunakan lebih banyak sulfur yang dilepaskan ke udara, akibat lainnya yaitu meningkatnya biaya penyulingan minyak karena sulfida yang terbentuk akan menyebabkan komponen penyulingan mudah aus.

2. Eubacteria

Eubacteria yang selanjutnya disebut bakteri di alam dijumpai dengan tingkat keragaman yang tinggi baik secara morfologi, ekologi, serta fisiologisnya. Bakteri dapat dijumpai pada rentang lingkungan yang luas yaitu mulai dari lingkungan yang sangat dingin di perairan Artik hingga lingkungan yang sangat panas di celah hidrotermal (**hydrothermal vents**) yang dapat mencapai suhu 100⁰C. Di alam bakteri dapat hidup bebas, saprofitik, fotosintetik, parasitik atau patogenik pada organisme lain. Dengan sifatnya tersebut beberapa bakteri dapat berperan dalam daur unsur dan berinteraksi dengan organisme lain, serta mempunyai peran lain yang sangat penting. Secara umum bakteri berkembang biak dengan pembelahan transversal atau biner.

Berdasarkan morfologinya bakteri dibedakan dalam 3 bentuk dasar yaitu:

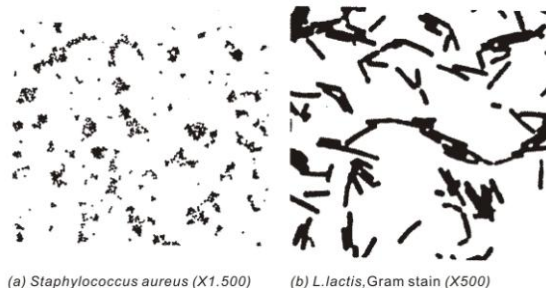
1. bulat atau kokus atau spheroid, dengan variannya tersusun tunggal, dua-dua (diplokokus), empat-empat (tetrakokus), tersusun sebagai rantai

- (streptokokus), tersusun delapan-delapan (sarcina) dan seperti buah anggur (stafilokokus)
- batang atau silindris, dengan variannya seperti diplobasilus, streptobasilus atau roset
 - bentuk lengkung dengan variannya berbentuk koma (vibrio) dan spiral

Bentuk bakteri selain dipengaruhi sifat genetis juga oleh umur dan faktor lingkungan, sehingga pada beberapa jenis bakteri tertentu dapat bersifat **pleomorfi** (tampil dengan bentuk morfologi yang bermacam-macam). Selain itu ada juga yang berbentuk **invulusi** yaitu penyimpangan morfologi sel dari morfologi normalnya karena keadaan lingkungan sekitar yang tidak menguntungkan seperti ketersediaan makanan, suhu, pH, dan kadar garam. Adapun ukuran bakteri sangat bervariasi dalam bilangan mikron μm .

Beberapa sifat genetis yang relatif sering berubah pada bakteri, yaitu: bentuk sel, aerobiosis, kemampuan menggunakan berbagai donor dan akseptor elektron, kemampuan fotosintesis yang didasarkan pada keberadaan khlorofil, motilitas, kandungan G + C. Adapun beberapa sifat genetis yang dikategorikan jarang berubah, yaitu: struktur dinding sel, lipid membran, fotosintesis oksigenik, dan metanogenesis.

Secara umum berdasarkan sifat dinding selnya, bakteri terdiri dari dua kelompok yaitu bakteri **Gram positif** dan **negatif**. Berdasarkan kebutuhan akan oksigen dikenal kelompok **anaerobik**, **fakultatif anaerobik** dan **aerobik**, sedang berdasarkan bentuk selnya dikenal beberapa bentuk, yaitu **kokus**, **batang**, dan **lengkung**, atau variasinya (Gambar 1.4). Pada beberapa anggota kelompok bakteri bentuk batang terbukti memiliki alat bantu pelekatan (*hold fast*) yang mendukung pembentukan pola-pola kelompok sel yang teratur. Sel-sel berbentuk spiral umumnya soliter, tidak saling melekat.



Gambar 1.4 Morfologi Sel-sel Bakteri

Pengelompokan bakteri sebagaimana "Bergey's Manual of Determinative Bacteria" tidak mencerminkan hubungan filogeninya. Oleh karena itu beberapa ahli menggunakan struktur DNA-nya untuk mencari pendekatan filogeni (filogenimolekular) dan mengelompokkan bakteri menjadi beberapa kelompok utama sebagai berikut:

- I. Kelompok pengoksidasi hidrogen (*Hydrogen oxydizer*), misal : *Aquifex* (termofilik, pereduksi oksigen)
- II. Kelompok Thermotogale, misal : *Thermotoga* (termofilik), *Fervidobacterium* (termofilik)
- III. Kelompok Thermodesulfobacterium, misal : *Thermodesulfobacterium* (termofilik)
- IV. Bakteri non sulfur hijau (*Green non-sulfur*), misal: *Chloroflexus* (fotosintetik, meluncur), *Herpetosiphon*, *Thermomicrobium* (termofilik)
- V. Kelompok Deinococcus, misal : *Deinococcus Thermus*(termofilik)
- VI. Kelompok Thermodesulfobivrio, misal: *Thermodesulfobivrio* (termofilik)
- VII. Kelompok Synergistes, misal : *Synergistes*
- VIII. Kelompok G + C rendah, Gram positif, misal: *Bacillus*, *Clostridium*, *Eubacterium*, *Heliobacterium* (fotosintetik), *Lactobacillus*, *Mycoplasma* (tidak berdinding sel), *Spiroplasma* (tidak berdinding sel)
- IX. Kelompok G + C tinggi, Gram positif, misal: *Bifidobacterium*, *Mycobacterium*, *Propionibacterium*, *Streptomyces*
- X. Kelompok Sianobakteri, misal: *Oscillatoria* (fotosintetik, meluncur), *Prochlorococcus* (fotosintetik), *Synechococcus* (fotosintetik)
- XI. Kelompok Planctomycetale, misal : *Planctomyces*
- XII. Kelompok Chlamydiales, misal: *Chlamydia*
- XIII. Kelompok Bakteri sulfur hijau (*Green sulfur*), misal: *Chlorobium* (fotosintetik)
- XIV. Kelompok Cytophaga, misal: *Bacteriodes*, *Cytophaga* (meluncur), *Flexibacter* (meluncur), *Flavobacterium*, *Rhodothermus* (termofilik)
- XV. Kelompok Fibrobacter, misal : *Fibrobacter*
- XVI. Kelompok Spirochaeta (Spirochete), misal: *Borrelia*, *Leptonema*, *Spirochaeta* (tanpa dinding sel), *Treponema*
- XVII. Proteobacteria (bakteri ungu/purple bacteria):

- subdivisi alpha, misal:
Agrobacterium, *Anaplasma* (tanpa dinding sel),
Rhodobacter (termofilik), *Rickettsia*
Rhodospirillum (termofilik)
- subdivisi beta, misal:
Neisseria, *Rhodocyclus* (fotosintetik)
- subdivisi gamma, misal:
Beggiatoa (meluncur), *Chromatium*
(fotosintetik), *Escherichia*, *Haemophilus*,
Legionella, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Vibrio*, *Yersinia*
- subdivisi delta/epsilon, misal:
Bdellovibrio, *Campylobacter*, *Desulfovibrio*,
Helicobacter, *Myxococcus*(meluncur), *Wolinella*

D. CENDAWAN

Cendawan merupakan organisme berfilamen, non-fotosintetik, heterotrofik, eukaryotik. Struktur satuan selulernya berupa **hifa** yang merupakan bentukan seperti benang tubular, dan tunggal. Hifae (jamak dari hifa) memiliki dinding sel yang mengandung khitin dan selnya memiliki organella seperti nuklei, mitokondria, ribosoma, dan badan Golgi. Sedang struktur sub-selulernya didukung dan diorganisasi oleh mikrotubuli dan retikulum endoplasma. Pada umumnya organella dan materi sel lainnya terkonsentrasi dekat ujung hifa. Bagian hifa lainnya terisi oleh vakuola yang besar, dan pada beberapa kelompok cendawan bagian tersebut dipisahkan dari bagian hifa muda oleh adanya septa. Hifa meluas dengan pertumbuhan ujung dan memperbanyak diri dengan membentuk cabang yang terjalin dan tersusun menjadi **miselium**. Beberapa kelompok cendawan tidak membentuk hifa, jika ada bentukan seperti hifa, hal itu merupakan pseudohifa. Kelompok ini merupakan cendawan bersel tunggal yang dikenal sebagai yeast atau khamir. Yeast umumnya berkembang biak dengan pembelahan biner dan pembentukan tunas. Yeast memiliki kisaran ukuran yang bervariasi yaitu $1-5\mu\text{m} \times 5-30\mu\text{m}$, umumnya berbentuk telur. Beberapa cendawan mampu membentuk badan buah yang besar (makroskopis) yang muncul ke permukaan tanah atau kayu, meskipun demikian sebagian besar massanya berupa miselium. Cendawan yang berbadan buah ini merupakan kelompok

Basidiomycetes, sebagai contoh antara lain *Pleurotus ostreatus*, *Volvariella volvacea*, *Auricula*, dan *Amanita*.

Dinding sel cendawan tersusun oleh khitin mikrofibril semikristalin yang terpadu dengan matriks amorf β -glukan, dan beberapa protein mungkin ikut menyusun dinding selnya. Pada cendawan tingkat tinggi hifae tumbuh melalui pertumbuhan ujung hifa yang diikuti dengan pembentukan septa. Sedangkan pada cendawan tingkat rendah tanpa diikuti pembentukan septa.

Pertumbuhan koloni cendawan dicirikan oleh perkembangan radial miselium pada substrat yang membentuk koloni sferik atau bundar. Pertumbuhan cendawan dapat diukur dengan mengukur perubahan massa miselial, setiap satuan waktu pada medium yang cukup nutrisi. Setelah fase lag, yaitu suatu periode eksponensial pendek yang ditunjukkan oleh pertumbuhan awal ujung hifa, dan begitu hifa baru tumbuh, pertumbuhan yang terjadi mengikuti laju pertumbuhan yang linear hingga nutrisi habis, kemudian diikuti oleh fase stasioner. Pertumbuhan hifa juga dapat diukur secara mikroskopi atau dengan menghitung total jumlah ujung hifa, dan membaginya dengan total panjang miselium pada koloni. Dengan cara ini rata-rata panjang hifa yang diperlukan untuk bertunasnya ujung hifa dapat dihitung. Hasilnya disebut sebagai **unit pertumbuhan hifa**. Daerah pertumbuhan perifer merupakan area miselium di belakang ujung tunas hifa, yang memungkinkan pertumbuhan radial pada tingkat pertumbuhan spesifik yang sama. Bagian ini berperan dalam mendukung pertumbuhan ujung hifa yang optimal.

Cendawan membutuhkan air untuk menyerap nutrisi, sehingga sebagian besar cendawan kehadirannya terbatas pada lingkungan yang lembab. Beberapa di antaranya merupakan cendawan perairan baik yang dijumpai di perairan asin maupun perairan tawar. Secara umum cendawan cenderung pada lingkungan yang bersifat asam dengan pertumbuhan optimal pada pH 4 - 6. Sedang kisaran suhu pertumbuhan antara 5 - 40°C, tetapi beberapa di antaranya ada yang psikrofilik yang tumbuh optimum pada suhu di bawah 5°C dan lainnya termofilik yang mampu tumbuh hingga suhu 50°C atau lebih.

Thalus cendawan terdiri dari 2 bagian yaitu miselium dan spora. Sebagaimana telah dijelaskan bahwa miselium tersusun oleh jalinan hifa. Terdapat 3 morfologi dasar hifa, yaitu:

1. hifa aseptat atau **senositik**, yaitu hifa yang tidak memiliki septa;

2. hifa bersepta dengan sel-sel berinti tunggal dan memiliki pori pada septatnya sehingga memungkinkan perpindahan sitoplasma maupun nukleus dari satu ruang ke ruang lainnya;
3. hifa bersepta dengan inti lebih dari satu (multi nukleat).

Cendawan tersebar luas di alam meskipun tidak seluas sebaran bakteri. Cendawan mudah dijumpai seperti pada bahan makanan yang kadaluwarsa, buah-buahan, nektar bunga, daun, tubuh serangga, tanah, dan air. Cendawan dapat bereproduksi dengan tunas, pembelahan sel atau fragmentasi thalus, pembentukan spora seksual dan aseksual, serta konjugasi. Berdasarkan perbedaan mekanisme reproduksi seksualnya, cendawan dibagi menjadi tiga filum (phyla, tunggal phylum), yaitu Gymnomycota, Mastigomycota yang keduanya disebut sebagai cendawan tingkat rendah, serta Amastigomycota yang disebut sebagai cendawan tingkat tinggi. Adapun Amastigomycota terdiri dari 4 sub-filum, yaitu: **Zygomycotina**, **Ascomycotina**, **Basidiomycotina**, dan **Deuteromycotina**.

1. Gymnomycota

Merupakan kelompok cendawan yang dikenal sebagai jamur lendir. Cendawan mampu menelan (fagotrofik) partikel nutrien, bersifat motil dan tidak memiliki dinding sel pada fase vegetatifnya. Pada fase vegetatif sel-selnya hidup bebas amoeboid. Sebagai contoh spesiesnya yaitu *Dictyostelium discoideum* dan *Polysphondelium violaceum*.

2. Mastigomycota

Merupakan kelompok cendawan yang mendapatkan nutrien dengan absorpsi, bersifat motil karena berflagela pada sebagian dari siklus hidupnya. Beberapa anggotanya ada yang hidup bebas dan ada pula yang parasit obligat pada tumbuhan dan hewan tingkat tinggi. Sebagai contoh spesiesnya yaitu: *Allomyces macrogynus*, *Rhizidiomyces arbuscula*, *Phytophthora infestans*, *Plasmodiophora brassica*, dan *Saprolegnia ferax*.

3. Amastigomycota

Kelompok ini mendapatkan nutrien dengan cara absorpsi, bersifat tidak motil. Merupakan kelompok cendawan utama yang terdiri atas 4 sub-filum, yaitu Zygomycotina, Ascomycotina, Basidiomycotina, dan Deuteromycotina.

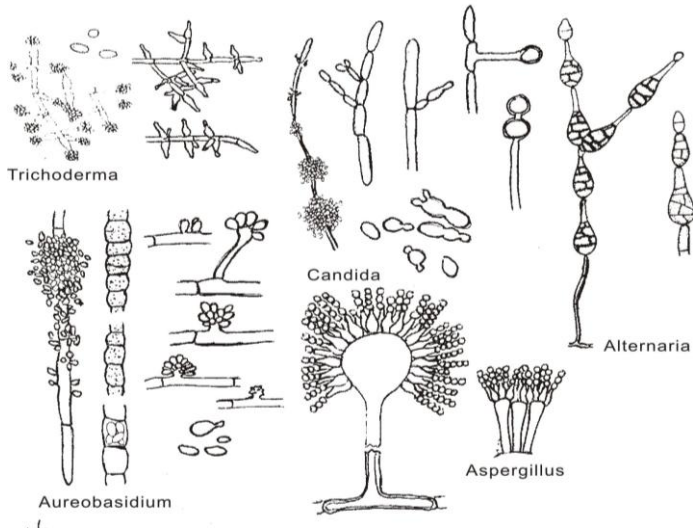
Zygomycotina pada umumnya bersifat senositik dan membentuk zigospora yaitu spora seksual yang berasal dari fusi gametangia. Reproduksi aseksualnya dengan sporangiospora, dapat bersifat parasitik atau saprofitik. Sebagai contoh genus yaitu: *Pilobolus* sp., *Rhizopus stoloniferus*, dan *Mucor rouxii*.

Ascomycotina memiliki anggota yang bersifat saprofitik, simbiotik maupun parasitik. Pada umumnya merupakan jasad uniseluler atau multisel dengan miselium berseptata dan berpori, memproduksi spora seksual berupa askospora yang dibentuk di askus (aski = jamak). Adapun spora aseksualnya berupa konidiospora. Beberapa contoh spesiesnya, yaitu: *Endothia parasitica*, *Ceratocystis ulmi*, *Saccharomyces cerevisiae*, dan *Neurospora crassa*.

Basidiomycotina jarang dijumpai dalam membentuk spora aseksual, adapun spora seksualnya diproduksi pada basidia yang terdapat pada tubuh buah yang kompleks. Hidup secara saprofitik, simbiotik atau parasitik, sel-selnya uniseluler atau berupa miselium berseptata. Beberapa contoh spesiesnya, yaitu *Amanita phalloides*, *Rhodospodium* sp., dan *Pleurotus* sp.

Deuteromycotina dikenal pula sebagai *fungi imperfecti* atau cendawan tidak sempurna, dapat bersifat saprofitik, simbiotik, parasitik dan predatori. Pada umumnya uniseluler atau multisel dengan miselium berseptata, reproduksi seksualnya belum diketahui jelas, sedang reproduksi aseksual dengan membentuk konidiospora yang muncul pada sel-sel khusus. Sebagai contoh spesiesnya, yaitu: *Candida albicans*, *Geotrichum candidum*, *Penicillium chrysogenum*, dan *Trichoderma reesei*.

Banyak manfaat maupun kerugian yang dapat ditimbulkan oleh cendawan. Beberapa cendawan diketahui bersifat patogen pada manusia, seperti: *Candida albicans*, *Trichosporon*; patogen tanaman *Phytophthora infestans*. Di antara cendawan mampu menghasilkan alfa toksin yang dibebaskan ke substrat pertumbuhannya sehingga akan merugikan orang atau hewan yang mengkonsumsi, misalnya: *Aspergillus flavus* yang menghasilkan afkatoksin. Adapula yang merupakan jamur beracun sehingga tidak dapat dikonsumsi, misalnya *Amanita*. Beberapa cendawan lainnya telah lama diketahui manfaatnya untuk kepentingan manusia, misalnya: *Penicillium chrysogenum* untuk produksi penisilin, *Rhizopus oligosporus* untuk membuat tempe, *Saccharomyces cerevisiae* untuk membuat minuman beralkohol dan roti. Beberapa contoh cendawan ditunjukkan pada Gambar 1.5.



Gambar 1.5. Beberapa contoh cendawan

E. ALGAE

Algae tersusun oleh dua kelompok yaitu algae prokaryota (*blue-green algae*) dan eukaryota. Pada umumnya algae prokaryota (protista) adalah uniseluler dan fotosintetik serta memperbanyak diri dengan membelah diri, hal ini sudah diuraikan pada bahasan sebelumnya. Algae eukaryota di antaranya dapat bersel tunggal atau multiseluler, bersifat motil (oleh adanya flagelum atau flagela) atau non-motil. Beberapa spesies, sel anakan yang diproduksi tidak melepaskan diri dari induk tetapi tetap menyatu dan membentuk koloni seperti pada *Volvox*, membentuk filamen seperti pada *Spirogyra*, atau membentuk lembaran talus (makroalgae) misalnya *Palmaria*, *Ulva*, dan *Sargassum*.

Algae sebagian besar memiliki dinding sel yang terdiri dari selulosa, beberapa di antaranya mengandung silika atau kalsium karbonat. Dinding sel dapat bersifat fibril seperti dijumpai pada cendawan, atau dapat pula tersusun oleh lempeng-lempeng yang disekresikan dari badan Golgi atau suatu polikel protein. Beberapa spesies memiliki flagela. Kebanyakan algae memiliki khloroplas meskipun struktur dan kandungan pigmennya beragam. Ada kelompok algae yang dinding selnya tidak kaku tetapi lentur dan terlindungi oleh polikel protein di bawah membran plasma. Sel-sel algae mengandung

nuklei, mitokondria, ribosom, badan Golgi, dan khloroplas. Struktur sel internal didukung oleh mikrotubuli dan retikulum endoplasma. Khloroplas sangat beragam, dapat besar dan tunggal, banyak seperti pita atau bentuk lainnya. Bentuk dan kandungan pigmen menentukan gambaran taksonominya.

Algae merupakan **polifiletik**, artinya bahwa asal-usul nenek moyangnya tidak dari satu jalur. Secara umum taksa Algae ditujukan untuk protista fotosintetik, tetapi pada kenyataannya banyak spesies di dalamnya yang juga bersifat fagositik dan saprofitik. Pembagian fila didasarkan pada struktur khloroplas dan pigmentasi, serta struktur dinding sel dan siklus hidupnya.

Pertumbuhan algae uniseluler sinonim dengan pembelahan biner. Pada banyak algae unisel, nuklei haploid maupun diploid mengalami mitosis, dan selnya kemudian membelah longitudinal membentuk 2 sel anak. Pada kebanyakan spesies dijumpai dua pembelahan haploid dalam sel induk yang diikuti dengan pembentukan 4 sel anakan yang motil. Algae berfilamen senositik melakukan pertumbuhan mirip seperti yang terjadi pada pertumbuhan hifa. Pertumbuhan lainnya terjadi melalui pembelahan sel vegetatif dalam filamen atau lembaran talus.

Perkiraan laju pertumbuhan algae dapat dilakukan dengan penghitungan sel atau kandungan khlorofil pada kultur. Kinetika pertumbuhannya serupa dengan cendawan, tetapi karena algae merupakan jasad fotosintetik, kekurangan nutrisi selain karbon dapat menyebabkan pertumbuhan menjadi lambat, dan masuk fase stasioner atau fase kematian. Nitrogen, fosfat, dan silikon seringkali menjadi faktor pembatas. Pada kondisi optimum, pembelahan biner berlangsung cepat dan menyebabkan ledakan populasi yang dikenal sebagai pasang merah (**red tides**) dan biasanya diikuti dengan turunnya jumlah populasi dalam tempo cepat.

Algae merupakan jasad yang hidup di perairan, tempat lembab atau berair yang dapat dijangkau oleh sinar matahari. Algae merupakan jasad fotosintetik dan mendapatkan sumber karbon dan energi yang dibutuhkan melalui fiksasi CO₂ secara fotosintesis. Adapun nitrogen harus didapat dalam bentuk nitrat, amonia atau asam-asam amino.

Algae protista fase vegetatif yang paling dominan dapat berupa diploid maupun haploid. Pertumbuhan vegetatif berhubungan dengan pembelahan mitosis sel. Pada algae haploid, meiosis berlangsung saat germinasi zigot dan sel tetap haploid untuk keseluruhan kehidupan vegetatifnya. Sedang pada

algae diploid, haploid hanya berlangsung dalam bentuk gamet, setelah pembentukan zigot sifatnya tetap diploid.

Berdasarkan perbedaan bentuk, pigmen, dan habitatnya, Algae dibedakan dalam 7 fila, yaitu:

1. **Chlorophyta:** khromatofornya berwarna hijau yang mengandung khlorofil a dan sedikit khlorofil b, beberapa jenis algae mengandung xanthofil, alfa karoten, dan beta karoten. Makanan cadangan disimpan dalam bentuk pati dan minyak. Dinding selnya berupa selulosa xilan, mannan, beberapa spesies mengalami kalsifikasi dan beberapa spesies lagi tidak memiliki dinding sel. Jika flagela ada, maka jumlahnya 1,2 hingga 8 atau lebih, panjangnya sama dan terletak apikal, Contoh anggotanya adalah: *Volvox globator*, *Clamydomonas*, *Ulothrix*, dan *Spirogyra*.
2. **Euglenophyta:** khromatofornya mengandung pigmen seperti pada chlorophyta. Cadangan makanan disimpan dalam bentuk paramylon (paramylon) dan minyak. Tidak memiliki dinding sel, kebanyakan anggotanya berflagela 1 hingga 3, dan terletak apikal atau sub-apikal. Contoh anggotanya yaitu: *Euglena* sp.
3. **Chrysoophyta:** khromatofornya berwarna hijau kekuningan hingga coklat keemasan karena adanya kandungan xanthofil dan karoten. Khromatofornya mengandung khlorofil a dan khlorofil c, alfa karoten, fukoxanthin dan satu jenis atau lebih xanthofil. Makanan cadangannya berupa chrysolaminarin dan minyak. Dinding sel berupa selulosa, silika, dan kalsium karbonat. Jika flagela ada maka jumlahnya 1-2, dapat sama atau tidak sama panjang, dan terletak apikal. Beberapa contoh antara lain: *Vaucheria* dan diatomae.
4. **Pyrrophyta:** khromatofornya berwarna hijau kekuningan hingga coklat tua, pigmen utamanya berupa khlorofil a dan khlorofil c, xanthofil, dan beta karoten. Makanan cadangan disimpan dalam bentuk pati dan minyak. Dinding sel berupa selulosa atau tanpa dinding sel. Memiliki flagela 2 yang berbeda fungsi. Contohnya antara lain *Gonyaulax polyedra*. Beberapa di antara anggotanya bersimbiosis pada invertebrata perairan laut sebagai simbion (zooxanthellae).
5. **Phaeophyta:** khromatofornya berwarna coklat keemasan, mengandung khlorofil a, khlorofil c, dan beberapa xanthofil (terutama fukoxanthin dan beta karoten). Makanan cadangan dalam bentuk laminarin, mannitol,

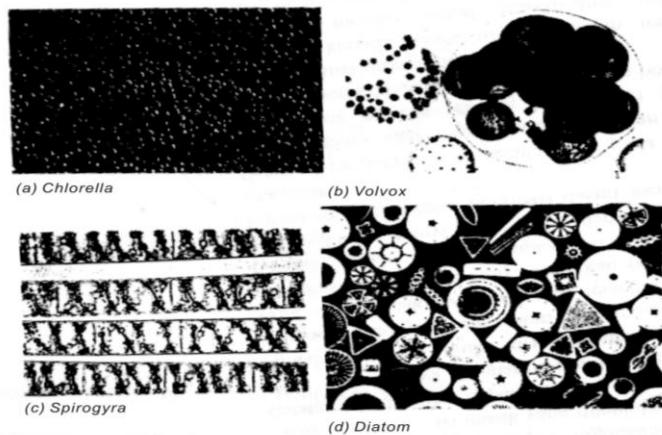
dan minyak. Hampir semuanya merupakan jasad yang hidup di laut terutama perairan pantai dan dapat berukuran besar hingga beberapa puluh meter. Contohnya antara lain *Fucus* dan *Sargassum*.

6. **Cyanophyta:** khromatofor utamanya berupa khlorofil a, beta karoten, xanthofil, fikobilin, dan fikoerithrin yang tersebar merata dibagian tepi sitoplasmanya, bukan pada plastida-plastida. Makanan cadangan berupa karbohidrat (spesifik Cyanophyceae) dan minyak. Tidak memiliki dinding sel, memiliki 2 flagela, tidak sama, dan terletak sub-apikal.
7. **Rhodophyta:** kromatofornya mengandung khlorofil a, karoten, xanthofil, fikoerithrin, dan fikosianin. Khromatofornya berwarna merah karena fikoerithrin paling dominan. Dinding sel terdiri dua lapisan, bagian dalam berupa mikrofibril yang kaku sedang lapisan luar lunak. Makanan cadangannya berupa sejenis pati yang dikenal sebagai **floridean starch** yaitu polisakarida mirip amilopektin pada tumbuhan tinggi dan minyak dan terutama hidup di laut.

Algae merupakan salah satu komponen plankton yaitu sebagai fitoplankton dan merupakan jasad yang menentukan produktivitas primer perairan. Secara umum algae memiliki nilai manfaat tinggi karena merupakan ujung rantai makanan, karena algae merupakan sumber pangan bagi hewan perairan seperti ikan. Adapun pada tanah-tanah lembab meskipun kehadirannya rendah algae dapat berperan sebagai penstabil dan dapat memperbaiki kualitas fisik tanah. Algae, khususnya makroalgae juga menjadi sumber berbagai bahan berharga seperti agar, karagenan, dan asam alginat. Agar dan karagenan merupakan polimer galaktosa atau senyawa yang mengandung galaktosa. Umumnya karagenan dihasilkan dari beberapa alga merah, seperti *Gigartina*, *Eucheuma*, dan *Chondrus*. Karagenan banyak digunakan sebagai penstabil dan pengemulsi produk makanan, bahan pasta gigi, dan produk farmasi lain, senyawa penyempurna tekstil dan kertas, serta industri lainnya. Agar umumnya dihasilkan dari *Gelidium* dan *Gracilaria*, biasa digunakan untuk kepentingan industri farmasi dan makanan. Adapun asam alginat dan alginat merupakan produk dari algae seperti *Macrocystis*, *Agarum*, *Laminaria*, *Fucus*, dan *Ascophyllum* banyak digunakan sebagai bahan tambahan pada industri makanan, pemekat cat, dan industri tekstil. Adapun kelompok diatom, cangkang silikanya merupakan penyusun tanah diatoma yang dapat dimanfaatkan sebagai filter, dan pada beberapa spesies

dapat dikonsumsi sebagai pangan, misalnya *algae Porphyra tenera*, *P. yezoensis*, *Chondrus*, *Acanthopeltis*, dan *Gracilaria*.

Beberapa algae juga dapat merugikan misalnya Prototheca yang dijumpai pada infeksi sistemik dan subkutan pada manusia, *Cephaleuros* yaitu anggota Chlorophyta yang merupakan patogen daun tanaman hortikultur, seperti teh, kopi, dan merica. Beberapa algae mampu menghasilkan toksin dan menimbulkan **red tide** sehingga banyak ikan mati. Contoh algae seperti ini adalah *Gymnodinium* dan *Gonyaulax*. Beberapa contoh algae ditunjukkan pada Gambar 1.6.



Gambar 1.6. Beberapa contoh algae

F. PROTOZOA

Protozoa merupakan kelompok mikroba yang memiliki keragaman yang tinggi baik dari segi morfologi maupun ukuran. Secara keseluruhan protozoa merupakan organisme eukaryotik, uniseluler, dan beberapa spesies lainnya membentuk koloni. Beberapa spesies hidup bebas atau bersimbiosis mutualistik dengan bakteri, algae atau organisme tingkat tinggi, beberapa lainnya bersifat parasitik dan predatori. Beberapa protozoa pada kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan mampu membentuk **kista** yaitu suatu kondisi dorman. Protozoa dapat dibedakan dalam 7 phylum, yaitu Sarcomastigophora, Labyrinthomorpha, Ciliophora, Apicomplexa, Microspora, Myxospora, dan Acetospora.

1. Sarcomastigophora

Sarcomastigophora bergerak dengan flagela, pseudopodia, atau keduanya. Reproduksi umumnya secara seksual terutama dengan singami (syngamy).

Sarcomastigophora terdiri dari 3 sub-phylum, yaitu:

- a. **Mastigophora** yang ditandai oleh adanya flagelum, meskipun tidak memiliki flagela pada seluruh bagian siklus hidupnya. Reproduksi biasanya secara pembelahan biner. Beberapa diantaranya mampu pula membentuk pseudopodia. Klas utama pada subphylum ini adalah **Phytoflagellata** yang memiliki organela berpigmen atau tidak berwarna yang disebut plastida dan dapat melakukan metabolisme baik secara fototrofik maupun heterotrofik. Pada umumnya Phytoflagellata digolongkan sebagai algae dan hal ini sudah dibicarakan sebelumnya. Adapun klas **Zooflagellata** bersifat obligat heterotrofik. Beberapa spesies mampu melakukan gerak amoeboid dan beberapa membentuk koloni, jenis lainnya memiliki cangkang luar berbahan silika. Sebagai contoh spesiesnya antara lain: *Chlamydomonas*, *Paranema*, dan *Euglena*.
- b. **Opalinata** merupakan kelompok organisme yang berflagela banyak pada permukaan tubuhnya. Sebagai contoh antara lain: genus *Opalina* dan *Trichonympha*.
- c. **Sarcodina** merupakan kelompok organisme yang bergerak dengan pseudopodia. Flagela mungkin dijumpai pada beberapa fase perkembangan awal siklus hidupnya. Reproduksi biasanya secara pembelahan, jenis lainnya seperti Mycetozoa yang memiliki siklus seksual. Organisme ini membentuk agregat atau koloni, menghasilkan bentuk multiselular. Sebagai contoh adalah *Arcella*, *Amoeba*, *Entamoeba*, dan *Diffugia*.

2. Labyrinthomorpha

Labyrinthomorpha merupakan kelompok organisme yang bergerak secara amoeboid dan memiliki organela dipermukaan sel (sagenostosoma) yang berhubungan dengan jaringan sitoplasma. Kelompok organisme ini melakukan reproduksi seksual dan menghasilkan spora berflagela. Umumnya

bersifat parasitik pada tumbuhan perairan laut. Salah satu contoh genusnya yaitu: *Labyrinthula*.

3. Apicomplexa

Apicomplexa merupakan parasit yang ditandai oleh hadirnya organela khusus yang dikenal sebagai kompleks apikal yang berlokasi di salah satu ujung selnya antara lain berupa cincin polar, rhoptri, dan mikronema. Apicomplexa dikatakan pula sebagai sporozoa karena memiliki fase spora pada siklus hidupnya. Kelompok organisme ini melakukan reproduksi seksual secara singami maupun aseksual. Sebagai contoh adalah *Plasmodium*, *Toxoplasma*, dan *Babesia*.

4. Microspora

Microspora merupakan kelompok organisme yang bersifat parasit intrasel pada hewan vertebrata terutama arthropoda. Selama perkembangan dalam sel inang, spora terbentuk dan dikeluarkan. Spora ber dinding tebal mengandung sporoplasma infeksius dan filamen polar yang merupakan media infeksi sporoplasma ke dalam sel inang. Reproduksi secara pembelahan biner. Salah satu contohnya yaitu *Nosema*.

5. Myxozoa

Myxozoa merupakan kelompok organisme yang bersifat parasit pada hewan berdarah dingin dan annelida. Memiliki spora multiseluler, dengan kapsul polar satu atau lebih dan sporoplasma, kista terbentuk di dalam organ dalam inangnya. Salah satu contohnya yaitu *Ceratomyxa*.

6. Ciliophora

Ciliophora merupakan kelompok organisme yang memiliki cilia setidaknya pada salah satu fase hidupnya. Susunan cilia merupakan dasar untuk membedakan anggota-anggota dari subphylum ini. Memiliki dua macam nuklei, reproduksi seksual dengan konjugasi, sedangkan aseksualnya secara pembelahan biner. Anggotanya dapat hidup bebas seperti *Paramecium*, *Stentor*, dan *Vorticella*. Sebagian yang lain bersifat komensalisme, dan sebagian yang lain bersifat parasitik seperti *Balantidium coli* yang merupakan penyebab sejenis penyakit disentri.

7. Acetospora

Acetospora memiliki spora multiceluler dengan satu atau lebih sporoplasma, tanpa kapsul polar maupun filamen polar, keseluruhan anggotanya parasitik. Contoh anggotanya yaitu *Paramyxa* dan *Haplosporidium*.

Kehadiran Protozoa terbukti membawa manfaat antara lain adalah perannya yang signifikan pada penurunan total padatan organik tersuspensi pada limbah serta merupakan komponen zooplankton perairan yang penting dalam budidaya perikanan. Tetapi beberapa kerugian juga dapat ditimbulkan oleh protozoa yang bersifat patogen, seperti *Entamoeba histolytica* penyebab disentri, *Plasmodium falciparum* penyebab malaria.

PERAN MIKROBA DI LINGKUNGAN

Berbagai aktivitas metabolik mikroba menunjukkan keterlibatannya dalam reaksi-reaksi kimiawi pada hampir semua lingkungan di alam. Mikroba memerlukan sumber energi termasuk akseptor elektron dan nutrisi, antara lain dalam bentuk air (H_2O_2) untuk berkembang dan reproduksi. Karena mikroba telah ada di bumi jauh lebih dulu dibanding organisme lainnya, mereka memiliki kemampuan untuk berkembang pada hampir semua lingkungan yang mampu memenuhi kebutuhan minimalnya. Energi yang diperlukan dapat berasal dari satu atau dua sumber misalnya cahaya (fotosintesis) atau oksidasi molekul-molekul yang tereduksi. Molekul-molekul yang dapat dioksidasi mungkin merupakan senyawa organik seperti gula-gula dan protein, atau suatu molekul anorganik seperti sulfur, besi, hidrogen, karbon monoksida atau ammonia atau kombinasi senyawa organik dan anorganik. Bahwa evolusi mikroba terus berlangsung dibuktikan dengan ditemukannya mikroba yang dapat melakukan metabolisasi sejumlah senyawa xenobiotik. Memang, prinsip-prinsip evolusi memperkirakan bahwa mikroba harus terlibat pada setiap nisea (niche) untuk memenuhi kebutuhan minimal fisik dan khemis.

Mikroba dijumpai pula hidup dalam tubuh organisme lain, pada lingkungan dengan suhu lebih dari $100^{\circ}C$, pH 2-11, serta dapat pula hidup pada kedalaman 3500 meter di bawah permukaan bumi atau *dalam larutan garam jenuh pada $0^{\circ}C$* . Mikroba mampu hidup pada kisaran lingkungan yang luas dengan melibatkan enzim-enzim yang memungkinkan mereka menggunakan sinar matahari sebagai energi serta beragam pasangan donor

aseptor elektron, sehingga mereka dapat menjalankan reaksi-reaksi oksidatif yang menghasilkan energi.

Secara ringkas dapat disebutkan bahwa mikroba di alam antara lain berperan:

1. Menjaga kesuburan tanah.
2. Mendekomposisi senyawa organik dari organisme yang mati.
3. Mengikat gas nitrogen ke dalam bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman.
4. Siklus unsur.
5. Secara langsung maupun tak langsung merupakan sumber makanan utama bagi segenap kehidupan di air tawar dan asin.

Banyak hal masih belum terungkap karena sejauh ini perhatian manusia hanya terhadap apa-apa yang langsung berkaitan dengan manusia, misalnya penyakit dan mikroba yang memiliki nilai komersial. Aktivitas mikroba di lingkungan melibatkan metabolisme yaitu semua reaksi terarah yang berlangsung di dalam jasad atau sel. Proses ini meliputi katabolisme atau proses penguraian materi yang disertai pembebasan energi dan anabolisme atau penyusunan materi (biosintesis) yang memerlukan energi. Katabolisme sendiri meliputi reaksi oksidasi-reduksi (biooksidasi) yang dapat berlangsung secara aerob (respirasi) maupun anaerob (fermentasi). Dalam proses metabolisme tersebut diperlukan nutrisi dan peran enzim.

Dalam memahami peran mikroba di alam, dikenal konsep lingkungan mikro. Lingkungan mikro yaitu ruang kecil yang berada dalam ekosistem bumi di mana beberapa faktor berbeda dari lingkungan di dekatnya. Sebagai contoh, satu gumpal kecil tanah, terdiri dari partikel pasir, serpihan daun, gumpalan tanah liat. Mikroba yang menempel pada partikel tanah liat memiliki lingkungan mikro yang berbeda dari mikroba yang menempel pada serpihan daun.

Di alam kebanyakan mikroba hidup berinteraksi dengan mikroba ataupun organisme lain. Bentuk interaksi tersebut dapat bersifat positif maupun negatif. Interaksi positif dapat bersifat mutualistik atau menguntungkan semua pihak, komensalistik atau menguntungkan salah satu pihak. Adapun interaksi negatif dapat bersifat **kompetitif**, jika kedua pihak memperebutkan kebutuhan yang sama, **predasi**, jika salah satu memangsa lainnya dan **parasitik** jika interaksi tersebut merugikan salah satu pihak.

Selain kedua bentuk dasar tersebut di atas, interaksi antara mikroba dengan mikroba atau organisme lain dapat bersifat **netral**, jika kedua-duanya tidak saling mempengaruhi. Kehadiran spesies baru seringkali mendorong punahnya satu atau dua spesies yang sebelumnya ada dalam suatu ekosistem, dan kehadiran jasad baru ini akan dapat menciptakan bentuk interaksi baru. Kenyataannya terjadinya mutasi pada organisme yang saling berinteraksi akan mendukung tercapainya bentuk asosiasi yang langgeng.

Interaksi antarorganisme dapat sangat sederhana, hanya melibatkan dua spesies atau dapat pula kompleks melibatkan interaksi banyak spesies. Adapun tingkat ketergantungannya beragam, beberapa organisme tetap dapat hidup tanpa kehadiran simbiotnya, misalnya adalah tanaman legum dengan bakteri *Rhizobium*. Sedang yang lainnya mampu ditumbuhkan terpisah di laboratorium tetapi tidak akan mampu hidup atau tidak akan dijumpai di alam, misalnya antara cendawan dan algae penyusun lumut kerak (*lichen*). Selanjutnya pembahasan terinci tentang interaksi antara mikroba dengan organisme lain akan dibahas pada bagian tersendiri.

Peran utama mikroba di alam di antaranya adalah siklus nutrien. Kompos merupakan salah satu contoh yang mudah. Buangan organik rumah tangga seperti sampah sayuran atau kebun melalui dekomposisi materi oleh mikroba, akan diurai menjadi mineral sehingga siap diserap oleh tumbuhan. Aktivitas mikroba di tanah antara lain berupa penguraian karbohidrat, menjadi produk akhir berupa CO_2 dan H_2O , dikatakan sebagai **proses geokimia**, karena berlangsung secara biologis maka dikatakan sebagai **proses biogeokimiawi**.

Keseluruhan transformasi kimia berlangsung melalui aktivitas biokimiawi, misalnya organisme fotosintetik mengubah CO_2 , air, dan sinar matahari menjadi senyawa organik, selanjutnya karena dekomposisi materi organik diubah oleh bakteri menjadi senyawa semula yaitu CO_2 dan H_2O . Dengan demikian maka proses ini dikatakan **siklus**. Tidak hanya karbon, keseluruhan nutrien untuk kehidupan organisme mengalami siklus terus-menerus dan masing-masing melibatkan sekelompok mikroba yang bertanggung jawab terhadap berlangsungnya siklus nutrien. Gambaran suatu siklus pada umumnya dimulai dengan struktur dasar yang diubah ke bentuk yang lebih kompleks (polimer). Untuk lebih jelasnya akan dibahas pada bab tersendiri.



LATIHAN

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

- 1) Jelaskan klasifikasi organisme menurut Carl Woese!
- 2) Berdasarkan inangnya, Virus dapat dibagi menjadi berapa kelompok? Sebutkan dan jelaskan!
- 3) Pada prokaryota, jelaskan perbedaan antara Archaeobakteri dan Eubacteria!
- 4) Sebutkan ciri-ciri yang dimiliki cendawan!
- 5) Mengapa algae disebut sebagai polifiletik? Jelaskan!

Petunjuk Jawaban Latihan

Untuk menjawab latihan soal tersebut, pelajari kembali materi tentang:

- 1) Klasifikasi organisme.
- 2) Virus.
- 3) Prokaryota, Tabel 1.5.
- 4) Cendawan.
- 5) Algae.



RANGKUMAN

Perkembangan teknologi telah meningkatkan industri dan senyawa-senyawa xenobiotik, keduanya telah memberikan tekanan yang cukup besar pada lingkungan sehingga perlu usaha-usaha mengatasi tekanan tersebut. Beberapa mikroba mampu mendegradasi cemaran limbah industri dan senyawa xenobiotik.



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Menurut Haeckel organisme dikelompokkan menjadi
 - A. 5 kingdom
 - B. 4 kingdom

- C. 3 kingdom
 - D. 2 kingdom
- 2) Sarcodina ditandai oleh alat gerak berupa
- A. cilia
 - B. flagela
 - C. cilia dan flagela
 - D. pseudopodia
- 3) Senositik yaitu
- A. jika hipa tidak berinti
 - B. jika hipa bersekat dan berinti banyak
 - C. jika hipa tidak bersekat dan berinti banyak
 - D. jika hipa bersekat dan berinti banyak
- 4) Virus memiliki ciri-ciri makhluk hidup meski tidak lengkap karena
- A. memiliki sampul
 - B. mengandung bahan genetik DNA atau RNA
 - C. obligat parasit
 - D. berinti
- 5) Archaeobacteria berbeda dengan eubacteria karena
- A. hidup di lingkungan ekstrem
 - B. tidak memiliki inti yang sebenarnya
 - C. RNA ribosomalnya
 - D. tidak memiliki dinding sel
- 6) Algae dibedakan terutama berdasar
- A. pigmen
 - B. habitat
 - C. ukuran
 - D. cara perkembangbiakan
- 7) Zooxanthellae merupakan bentuk simbiosis dari
- A. bakteri
 - B. cendawan
 - C. protozoa
 - D. algae

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 Kegiatan Belajar 3. **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) B
- 2) C
- 3) C
- 4) D
- 5) A

Tes Formatif 2

- 1) C
- 2) D
- 3) C
- 4) B
- 5) C
- 6) A
- 7) D

Daftar Pustaka

- Atlas, R.M. & Bartha, R. (1987). *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications*. Second ed. Menlo Park: The Benjamin/Cumming Publ. Co., Inc.
- Holt, J.G., Krieg, N.R., Sneath, P.H.A., Staley, J.T., & Williams, S.T. (1994). *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Ninth Ed. Williams & Wilkins. Batimore.
- Maier, M.R., Pepper, I.L., & Gerba, C.P. (1999). *Environmental Microbiology*. Sandiego: Prentice-Hall.
- Mitchell, R. (1974). *Introduction to Environmental Microbiology*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Nicklin, J. Graeme-Cook, K., Paget, T.& Killington, R. (1999). *Instant Notes in Microbiology*. Oxford: Bios Scientific Publishers.
- Pelczar, M.J. Jr., Chan, E.C.S. & Krieg, N.R. (1986). *Microbiology*. New York: McGrawHill Book Co.