

MODUL 6

SISTEMATIKA PROKARIOT

Pendahuluan

Setelah Anda memahami materi pada modul 5 yang membahas sejarah tentang garis keturunan utama kehidupan, pada modul 6 ini, selanjutnya Anda dapat mempelajari sistematika prokariot.

Dalam modul ini, Anda akan mempelajari sistematika domain Bacteria dan sistematika domain Archaea.

Modul ini terdiri atas 2 kegiatan belajar. Dalam kegiatan belajar 1 dibahas tentang sistematika domain Bacteria. Sedangkan sistematika domain Archaea dibahas pada kegiatan belajar 2.

Setelah mempelajari materi, melakukan tugas, dan latihan yang terdapat pada modul ini, Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan sistematika domain Bacteria,
2. menjelaskan sistematika domain Archaea.

Agar Anda berhasil dalam mempelajari modul ini, ikutilah petunjuk belajar berikut ini:

1. Bacalah uraian dan contoh pada kegiatan belajar secara global. Tujuannya untuk mengetahui pokok-pokok pikiran yang diuraikan dalam kegiatan belajar ini.
2. Setelah Anda mengetahui garis besar pokok-pokok pikiran dalam materi uraian ini, baca sekali lagi secara lebih cermat. Membaca secara cermat bertujuan untuk mengetahui pokok-pokok pikiran dari setiap sub pokok bahasan.
3. Untuk memudahkan Anda mencari kembali hal-hal penting seperti prinsip dan konsep esensial, beri tanda pada konsep dan prinsip penting. Kemudian Anda cari hubungan antara konsep tersebut, sehingga Anda memiliki pemahaman konsep dan prinsip yang bermakna. Bila ada istilah yang kurang jelas, coba Anda manfaatkan glosarium.
4. Bila Anda merasa belum yakin dalam membaca uraian pada kegiatan belajar ini, ulangi lagi membaca materi kegiatan belajar sekali lagi.
5. Pelajari cara-cara menyelesaikan soal pada contoh-contoh soal yang diberikan pada kegiatan belajar ini! Caranya adalah sebagai berikut :
 - a. Bacalah soal yang akan Anda kerjakan.

- b. Analisis materi dalam soal ini dengan menuliskan apa-apa saja yang diketahui dalam soal ini.
 - c. Cari permasalahan atau pertanyaan dari soal tersebut.
 - d. Buat kerangka rencana penyelesaian soal tersebut dengan menuliskan konsep yang diperlukan dan cari hubungan antarkonsep tersebut.
 - e. Tuliskan hasil jawaban Anda pada akhir penyelesaian soal, sesuai dengan pertanyaan yang harus di jawab dalam soal.
6. Setelah Anda selesai mempelajari contoh soal, coba Anda buat soal-soal yang tercantum dalam latihan pada kegiatan belajar modul ini. Bila Anda mendapat kesulitan dalam menyelesaikan soal-soal latihan ini, pelajari panduan petunjuk penyelesaian soal latihan.
 7. Setelah Anda membaca, mempelajari, dan berlatih materi uraian pada kegiatan belajar pada modul ini, coba selesaikan soal-soal pada tes formatif yang tertulis pada bagian akhir modul ini tanpa melihat kunci jawaban.

KEGIATAN BELAJAR 1

SISTEMATIKA DOMAIN BACTERIA

Domain Bacteria

Sebelum Anda mempelajari tentang apa itu Sistematika Domain Bacteria, silakan Anda pelajari terlebih dahulu sekilas tentang dunia Prokariot secara umum. Bila kita bicara tentang Prokariot maka yang kita bicarakan mencakup dua domain besar organisme yang dikenal dengan domain Bacteria dan Archaea. Dua domain ini memiliki kesamaan dalam struktur umum selnya, yaitu keduanya tidak memiliki sistem endomembran.

Dalam hal dampak metabolisme dan jumlahnya, prokariota masih mendominasi biosfer, mengalahkan jumlah gabungan seluruh eukariota. Jumlah prokariota yang hidup dalam segumpal tanah, mulut, atau kulit manusia jauh melebihi jumlah total manusia yang sudah pernah hidup di bumi. Prokariota sejauh ini tidak saja merupakan organisme yang paling banyak jumlahnya, tetapi juga merupakan organisme yang paling mudah berkembang biak dan memperbanyak populasinya. Di manapun kita menemukan kehidupan dari jenis apapun, prokariota pasti ditemukan diantara organisme yang ada. Prokariota juga dapat bertahan hidup pada habitat yang sangat panas, sangat dingin, sangat asin, sangat asam atau sangat basa. Prokariota, yang kehadirannya dan keberlimpahannya tiada banding itu, telah bertahan dan memperbanyak jumlah dan jenisnya selama miliaran tahun secara turun-temurun dari sel-sel pertama yang merupakan awal dari seluruh kehidupan di bumi.

Sebagian besar Prokariota berukuran relatif kecil dibandingkan dengan ujung jarum. Meskipun individu prokariota adalah mikroskopik (sangat kecil), dampak kolektifnya pada bumi dan seluruh kehidupan sangat luar biasa. Kita jarang sekali memperhatikan mikroba yang ada dimana mana itu karena mikroba pada umumnya tidak dapat dilihat dengan mata telanjang. Penyakit menular yang disebabkan oleh organisme prokariota kadang-kadang mengingatkan kita bahwa organisme yang sangat kecil itu ada, akan tetapi prokariota bukanlah merupakan kumpulan makhluk-makhluk jahat. Hanya sebagian kecil organisme prokariota menyebabkan penyakit pada manusia atau organisme lain, tetapi sebagian besar lainnya sangat penting bagi seluruh kehidupan di Bumi. Sebagai contoh, prokariota tertentu merombak bahan-bahan dari organisme yang sudah mati dan mengembalikan unsur kimia yang penting ke lingkungan dalam bentuk senyawa anorganik yang diperlukan oleh tumbuhan, dimana selanjutnya tumbuhan tersebut dikonsumsi oleh hewan. Jika untuk beberapa alasan tertentu semua prokariota secara mendadak mati, maka siklus kimia yang menopang kehidupan akan berhenti, dan semua bentuk kehidupan lain akan mengalami

malapetaka. Sebaliknya, kehidupan prokariotik tidak diragukan lagi akan tetap bertahan meski tanpa eukariota, sebagaimana berlangsung selama sekitar 2 miliar tahun dalam sejarah awal kehidupan di bumi.

Prokariota seringkali hidup dalam asosiasi yang dekat dengan sesamanya dan dengan eukariota, dalam hubungan yang kita sebut simbiosis. Kasus simbiosis yang secara historis paling penting adalah berkembangnya mitokondria dan kloroplas dari prokariota yang menjadi organel di dalam sel-sel inang yang lebih besar. Demikian, hewan, tumbuhan, fungi, dan protista kemungkinan berkembang dari penggabungan simbiotik sel-sel nenek moyang.

Prokariota modern memiliki struktur dan fungsi fisiologi yang beraneka ragam . sekitar 5000 spesies prokariota telah diketahui, dan perkiraan keanekaragaman prokariota sesungguhnya dalam kisaran 400.000 sampai 4 miliar spesies.

Dalam sistem klasifikasi tradisional lima kingdom, prokariota menyusun kingdom Monera dan empat kingdom eukariotik adalah Protista, Plantae, Fungi dan Animalia. Skema ini menekankan perbedaan struktural antara sel-sel prokariota dan eukariota. Akan tetapi, selama satu dekade belakangan para ahli sistematika menentukan bahwa sebuah kingdom tunggal yang menggabungkan semua prokariota tidaklah sesuai dengan sejarah evolusi. Dengan membandingkan RNA ribosom dan urutan lengkap genom beberapa spesies yang masih hidup saat ini, para peneliti telah mengidentifikasi dua cabang utama evolusi prokariota. Nama untuk kedua kelompok ini adalah Bacteria (yang dulunya disebut EuBacteria) dan Archaea (dulunya disebut archaeBacteria). Istilah Archaea menunjukkan betapa tuanya asal mula kelompok itu dari sel-sel paling awal (bahasa Yunani, *archaio*, "kuno"). Sebagian besar spesies Archaea menempati lingkungan yang ekstrim, yang menyerupai habitat pada Bumi Purbakala. Namun demikian, sebagian besar prokariota adalah bakteri. Mereka berbeda dari Archaea dalam ciri-ciri pokok struktural, biokimiawi, dan fisiologis.

Ketika para peneliti, yang dipimpin oleh Carl Woese dari University of Illinois, pertama-tama mengetahui perbedaan antara Bacteria dan Archaea, mereka mengusulkan suatu sistem enam kingdom: dua kingdom prokariotik dan empat kingdom eukariotik. Karena Bacteria dan Archaea berpisah sangat awal dalam sejarah kehidupan. Woese dan banyak ahli lain sistematika lain sekarang lebih menyukai pengelompokan keanekaragaman kehidupan dalam tiga domain, suatu tingkat taksonomi di atas kingdom. Prokariota meliputi dua domain: Domain Bacteria dan Domain Archaea.

Sistematika Domain Bacteria

Bakteri dapat menjelaskan sebagian besar prokariota dengan memahami cara nutrisi dan metabolisme utamanya yang ditunjukkan oleh ribuan spesiesnya yang telah diketahui. Bakteri memiliki keanekaragaman yang luas sejak lama di masa silam, sehingga ikatan evolusioner antara berbagai kelompok taksonomik sampai saat ini masih belum jelas. Sistematika molekuler menawarkan alat yang paling ampuh untuk melacak evolusi prokariota, dan para peneliti sekarang dapat mengusulkan subdivisi taksonomik dari Domain Bacteria yang secara filogenetik masuk akal. Para ahli sistematika mengenali sekitar lusinan kelompok Bacteria.

Sebelum kita mempelajari sistematika dari Bacteria, kita pelajari terlebih dahulu pengelompokan bakteri berdasarkan cara memperoleh nutrisinya. Nutrisi disini diartikan sebagai cara suatu organisme untuk mendapatkan dua sumberdaya untuk mensintesis senyawa organik yaitu energi dan sumber karbon. Seluruh mikroorganisma harus memiliki suatu sumber karbon untuk menyediakan blok-blok pembangun dan mereka membutuhkan sumber energi untuk mengendalikan reaksi-reaksi yang mencakup proses sintesis komponen-komponen sel. Spesies yang menggunakan energi cahaya disebut **fototrof**. **Kemotrof** mendapatkan energinya dari senyawa kimia yang diambil dari lingkungan. Jika suatu organisme hanya memerlukan **senyawa anorganik CO₂** sebagai sumber karbon, maka organisme tersebut disebut **autotrof**. **Heterotrof** memerlukan paling tidak satu **nutrien organik**, misalnya, glukosa sebagai sumber karbon untuk pembuatan senyawa organik lain Bacteria dapat dikelompokkan menjadi 4 kelompok besar berdasarkan pada sumber karbon dan sumber energi. Perbedaan kelompok didasarkan pada sumber karbon dan sumber energi, yaitu penggunaan CO₂ dikelompok yang satu dan pada kelompok yang lainnya menggunakan kompleks organik sebagai sumber karbonnya, dan cahaya atau reaksi kimiawi sebagai sumber energinya. Kita dapat menggabungkan kriteria fototrof-versus-kemotrof (sumber energi) dan autotrof-versus-heterotrof (sumber karbon) untuk mengelompokkan Bacteria berdasarkan keempat caranya memperoleh nutrisi pokok :

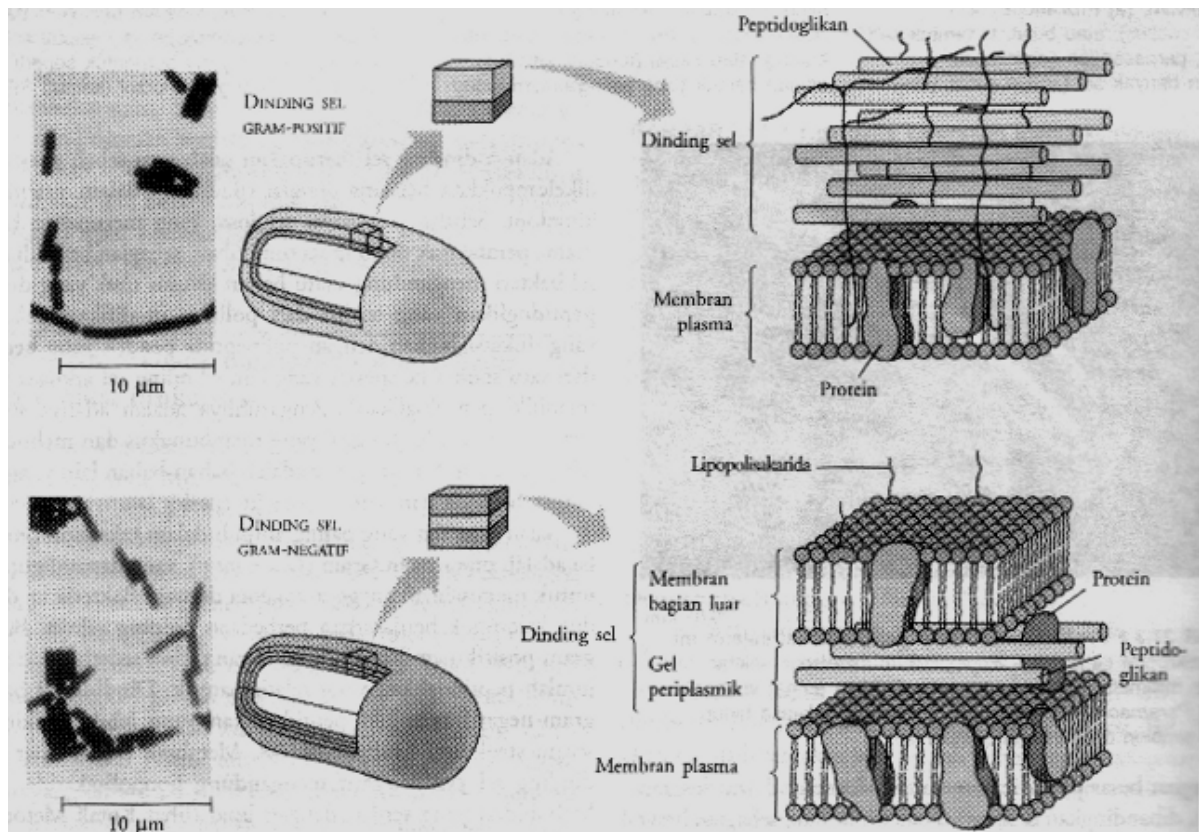
1. **Fotoautotrof** adalah organisme fotosintetik yang memanfaatkan energi cahaya untuk menjalankan sintesis senyawa organik dari karbon dioksida (CO₂). Alat metabolisme yang dikhususkan pada organisme ini adalah membran internal dengan sistem pigmen yang menangkap cahaya. Diantara kelompok bakteri fotosintetik yang beragam itu terdapat sianobakteri. Pada bakteri fotoautotrof obligat, bakteri hanya tumbuh jika tersedia cahaya dan CO₂. Bakteri fotoautotrof obligat menggunakan senyawa

anorganik seperti H_2O , H_2 , atau H_2S sebagai donor elektron untuk mereduksi CO_2 menjadi komponen karbon sel (CH_2O)

2. **Kemoautotrof** hanya memerlukan karbon dioksida sebagai sumber karbon, tetapi tidak menggunakan cahaya sebagai sumber energi, bakteri ini mendapatkan energi dengan cara mengoksidasi bahan-bahan anorganik. Energi kimia diekstraksi dari hydrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), ion fero (Fe^{2+}) atau beberapa bahan kimia lain, tergantung pada spesiesnya. Pada bakteri kemoautotrof aerobik menggunakan O_2 sebagai akseptor elektron terakhir.
3. **Fotoheterotrof**. Bakteri fotoheterotrof tumbuh melalui fotosintesis, dapat menggunakan cahaya untuk menghasilkan ATP, tetapi harus menggunakan karbon dalam bentuk organik. Cara memperoleh nutrisi seperti ini hanya terbatas pada bakteri tertentu. Biasanya, organisme dalam kelompok ini membutuhkan faktor pertumbuhan seperti vitamin B, dan beberapa spesies dapat tumbuh pada substrat organik jika tersedia oksigen.
4. **Kemoheterotrof** harus mengonsumsi molekul organik untuk sumber energi dan karbon. Cara memperoleh nutrisi seperti ini banyak ditemukan pada berbagai organisme. Substrat yang menjadi sumber nutrisinya bisa berupa glukosa atau suksinat, atau sumber karbon dan energi lainnya yang mungkin berbeda. Sebagai contoh pereduksi sulfat menggunakan H_2 untuk sumber energi tetapi membutuhkan substrat organik untuk biosintesis di dalam selnya. Sebagian besar mikroba yang sudah dipelajari termasuk ke dalam kelompok ini.

Selain berdasarkan cara memperoleh nutrisinya, bakteri pun berdasarkan pada struktur dinding selnya dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok yaitu bakteri **Gram positif** dan **Gram negatif**. Seperti yang sudah Anda baca pada modul lain, adanya dinding sel merupakan salah satu sebab prokariota dikelompokkan bersama dengan tumbuhan (sistem dua kingdom). Sebagai pengganti selulosa, yang merupakan bahan utama pembentuk dinding sel tumbuhan, sebagian besar sel bakteri mengandung suatu bahan khusus dan unik yang disebut **peptidoglikan** yang terdiri dari polimer modifikasi molekul-molekul gula yang diikat silang oleh polipeptida pendek yang berbeda dari satu spesies ke spesies yang lainnya. Pengaruhnya adalah adanya sebuah jaringan molekuler tunggal yang membungkus dan melindungi seluruh sel itu. Struktur luar adalah bahan-bahan lain yang juga sangat berbeda dari spesies ke spesies lainnya.

Berdasarkan sifat dari dinding sel bakteri tersebut, telah dikembangkan suatu metode pewarnaan oleh **Hans Christian Gram**, seorang dokter Denmark, pada akhir tahun 1800-an. Metoda yang dikembangkan ini merupakan suatu metoda pewarnaan untuk membedakan antara dua jenis dinding sel bakteri. Bakteri diwarnai dengan suatu zat warna violet dan yodium, dibuils dengan alkohol, dan kemudian diwarnai sekali lagi dengan zat warna merah. Struktur dinding sel akan menentukan respon pewarnaan. Bakteri Gram positif yang sebagian besar dinding selnya mengandung peptidoglikan akan menjerat warna violet. Bakteri Gram negatif memiliki lebih sedikit peptidoglikan yang terletak pada daerah Gel periplasmik yang terletak antara membran plasma dan suatu membran dibagian luar. Zat warna violet yang digunakan dalam pewarnaan Gram sangat mudah dibilas dari bakteri Gram negatif, akan tetapi selnya tetap menahan zat warna merah. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop cahaya.



Gambar 6.1.1 Struktur dinding bakteri Gram positif dan bakteri Gram negatif. Bandingkan komponen utama dinding sel kedua jenis bakteri, bagaimana letak peptidoglikan pada kedua bakteri tersebut. Peptidoglikan inilah yang membedakan hasil pewarnaan Gram yang berbeda pada kedua bakteri tersebut. (Sumber : Campbell et al., 2000)

Di antara bakteri patogen, yang menyebabkan penyakit, spesies Gram negatif umumnya lebih berbahaya dibandingkan dengan spesies Gram positif. Liposakarida yang terdapat pada dinding sel bakteri Gram negatif sering bersifat racun dan membran bagian luar membantu melindungi bakteri patogen melawan sistem pertahanan inangnya. Lebih jauh bakteri Gram negatif lebih tahan terhadap antibiotik dibandingkan dengan bakteri Gram positif karena membran bagian luar itu menghalangi masuknya obat-obatan.

Ahli bakteri telah memulai untuk membuat klasifikasi dengan menggunakan informasi filogenetik dari analisis rRNA. Melalui data dari RNA ribosom organisme di bumi terbagi menjadi tiga domain yaitu Bakteri dan Archaea yang termasuk ke dalam kelompok prokariotik serta Eucarya merupakan kelompok eukariotik. Domain-domain tersebut dapat juga dibedakan dari fenotiknya. Sebagai contoh: mengacu pada komposisi pelindung sel dari organisme-organisme tersebut. Peptidoglikan hanya ditemukan pada Bakteri sedangkan pada Archaea dan Eucarya tidak ditemukan. Lebih lanjut, lipid dari Bakteri dan Eucarya berkaitan dengan ester, sedangkan pada Archaea lipidnya berkaitan dengan ether. Di bawah ini karakteristik dari beberapa filum dari domain Bacteria. Klasifikasi pada tulisan ini mengacu pada **Perry et al.** (2002) yang terdiri atas 20 filum bakteri.

Filum Proteobacteri

Kelompok ini memiliki anggota yang besar dan organismenya beragam. Empat tipe utama cara memperoleh nutrisi pada bakteri terdapat pada kelompok ini. Beberapa organisme bersifat fotosintetik, sementara itu beberapa bersifat heterotrofik dan yang lainnya bersifat kemolitotrofik (kemoheterotrof). Bakteri kemolitotrofik termasuk bakteri pemfiksasi nitrogen, thiobacilli, filamen pengoksidasi sulfur (*Beggiatoa* dan genus-genus yang berkerabat) dan banyak spesies yang tumbuh sebagai autotrof hidrogen. Jika ada fiksasi karbon dioksida, siklus terjadi pada seluruh anggota filum ini melalui siklus Calvin Benson. Mitokondria yang terdapat pada hampir seluruh eukariota serupa dengan kelompok bakteri ini.

Termasuk ke dalam kelompok ini adalah bakteri ungu yang bersifat fotoautotrof dengan bakterioklorofil yang dibentuk di dalam kantong membran plasma; mengekstraksi elektron dari molekul selain H₂O, misalnya H₂S. Dengan demikian tidak membebaskan oksigen. Sebagian besar spesies adalah anaerob obligat. Kelompok ini ditemukan dalam sedimen kolam, danau, dan lapisan lumpur; banyak spesiesnya berflagela.

Proteobacteri kemoototrofik ada yang hidup bebas dan ada juga yang bersimbiosis. Banyak di antaranya memegang peranan penting dalam siklus kimiawi ekosistem, termasuk

fiksasi nitrogen (konversi N₂ atmosfer menjadi mineral bernitrogen yang dapat digunakan oleh tumbuhan). Genus *Rhizobium* dan *Agrobacterium* merupakan dua contoh genus yang hidup secara simbiotik dalam bintil akar kacang-kacangan dan legum lainnya, yang menyumbangkan nutrisi bagi tumbuhan tersebut.

Kelompok bakteri ini juga beranggotakan kebanyakan bakteri heterotrofik gram negatif. Termasuk ke dalam kelompok ini adalah *Pseudomonas*, bakteri **enterik** (yang menempati saluran usus hewan) seperti *E. Coli*, *Vibrio*, termasuk *Salmonella* yaitu salah satu mikroorganisme yang menyebabkan keracunan makanan, dan bakteri luminisen, serta kebanyakan bakteri dengan morfologi yang khas seperti bakteri prosteka.

Bakteri gram negatif pereduksi sulfat seperti *Desulfovibrio* juga ditemukan pada kelompok ini. Juga termasuk ke dalam filum ini adalah *Myxobacteria* yang membentuk struktur buah dan yang uniseluler, *Bdellovibrio* merupakan bakteri predator yang tidak dapat bergerak dengan cara meluncur

Filum Firmicutes

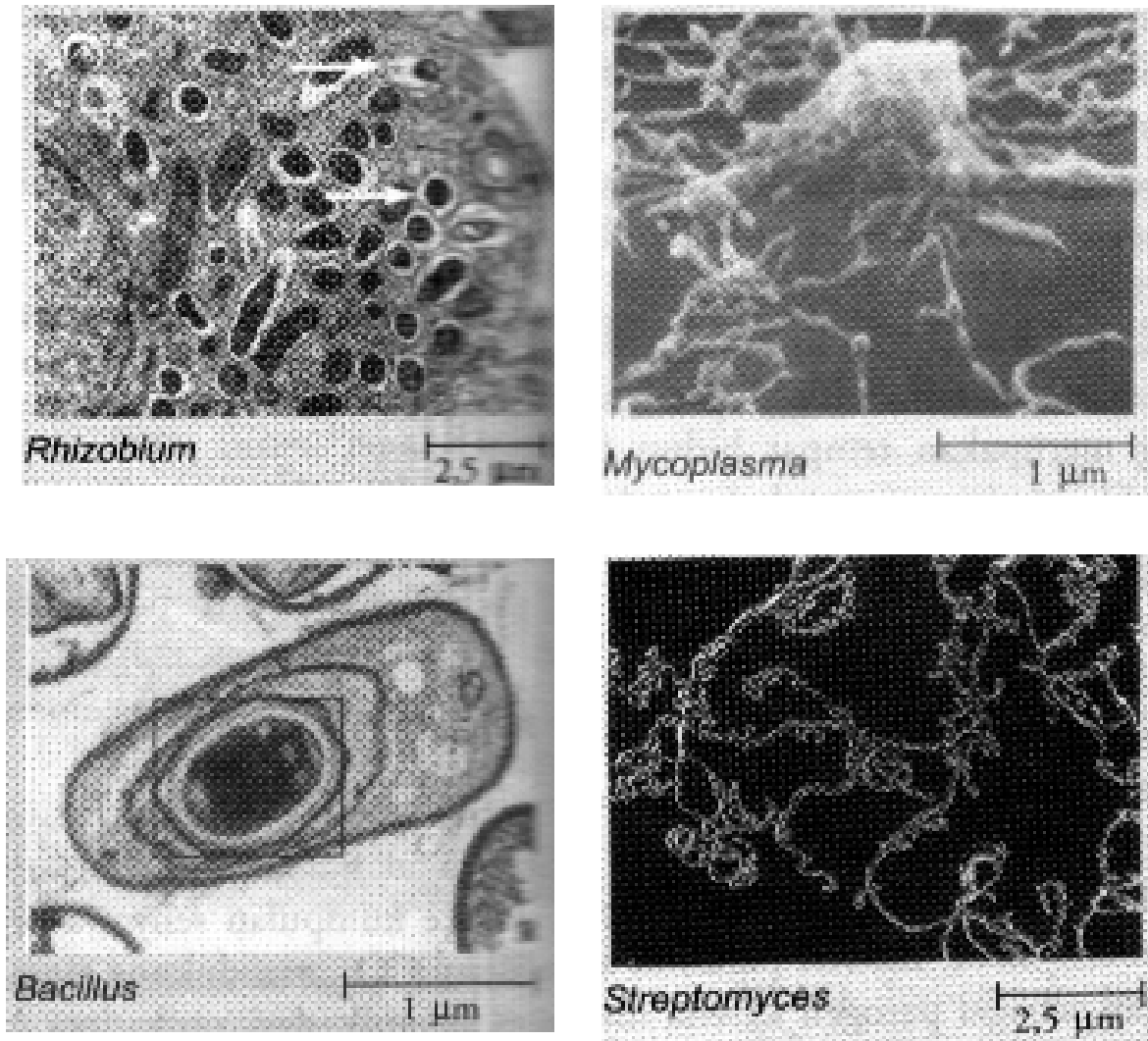
Bakteri-bakteri dari kelompok ini hampir seluruhnya termasuk gram positif, kecuali kelompok *Mycoplasma* semuanya tidak memiliki dinding sel dan oleh karena itu termasuk Gram negatif. Sedangkan seluruh anggota lainnya dari kelompok ini memiliki peptidoglikan yang besar pada struktur dinding selnya.

Firmicutes merupakan organisme uniseluler yang memiliki kandungan mol % G+C yang rendah. Kebanyakan berbentuk kokus atau batang, dan beberapa menghasilkan endospora. Contohnya, *Bacillus* bersifat aerob atau pembentuk spora fakultatif, sedangkan spesies *Clostridium* merupakan organisme yang melakukan fermentasi. Beberapa merupakan pereduksi sulfat. Sedangkan **Heliobacteria**, merupakan kelompok yang mampu melakukan fotosintesis dan menghasilkan sejenis klorofil dengan bentuk yang unik yang disebut **bakterioklorofil (Bchl g)**.

Filum Actinobacteria

Merupakan bakteri gram positif, memiliki bentuk beragam dari organisme uniseluler (seperti *Micrococcus*) sampai bercabang (*Corynebacterium*), membentuk filamen dan miselium (seperti *Actinomyces*). Kelompok ini umumnya adalah organisme yang hidup di dalam tanah. Beberapa diantaranya menghasilkan tahapan diseminasi yang disebut konidiospore yang dapat bertahan selama periode kering. Contoh lainnya : *Arthrobacter*, *Geodermatophilus*, *Frankia*(bersimbiosis dengan tumbuhan non Legum), *Mycobacterium*

(salah satu spesiesnya *M. tuberculosis*; penyebab TBC), *Streptomyces* (genus yang menghasilkan beberapa antibiotik yang penting bagi manusia seperti: tetrasiklin, chloramphenikol, streptomisin dan eritromisin).



Gambar 6.1.2 Beberapa contoh bakteri yang mewakili beberapa filum. *Rhizobium* genus yang hidup secara simbiotik dalam bintil akar. *Mycoplasma* satu-satunya genus anggota Firmicutes yang termasuk Gram negatif. *Bacillus* bersifat aerob atau pembentuk spora fakultatif. *Streptomyces* genus yang menghasilkan beberapa antibiotik yang penting (Sumber : Campbell et al., 2000).

Filum Chloroflexi

Chloroflexi mirip dengan bakteri sulfur hijau hanya di dalamnya terdapat **chlorosom** dan bersifat fototrofik. Pada kelompok ini terdapat genus *Chloroflexus*, bakteri hijau yang mampu meluncur yang sangat bervariasi dalam metabolismenya, bersama dengan *Heliobacterium* dapat ditemukan pada mata air panas dengan temperatur antara 35°C–56°C. Anggota-anggotanya dapat tumbuh sebagai heterotrof atau fotosintesis. CO₂ tidak difiksasi baik melalui **Siklus Calvin Benson** atau **reduksi TCA** tetapi melalui suatu jalur sepesial yang hanya dikenal untuk kelompok bakteri ini yaitu **jalur hydropropionat**. Contoh lainnya *Oscillochloris*.

Chlorobi

Kelompok ini merupakan kelompok bakteri sulfur hijau. Bakteri sulfur hijau merupakan bakteri yang melakukan fotosintesis tetapi tidak menghasilkan oksigen (**anoxygenic photosynthetic**). Beberapa berbentuk uniseluler dan yang lainnya membentuk jaringan dari sel-sel. Tidak satu pun yang bergerak dengan flagela atau bergerak meluncur. Beberapa memiliki vakuola gas (penting untuk pergerakan vertikal). Kelompok ini menggunakan jalur reduksi asam trikarboksilat (TCA) dari pada Siklus Calvin-Benson untuk memfiksasi karbon dioksida. Beberapa contohnya antara lain : *Chloroherpeton* berbentuk batang memanjang, *Chlorobium* uniseluler berbentuk batang, dan *Ancalochoris* banyak ditemukan di perairan tawar.

Cyanobacteria

Fotoautotrof dengan fotosintesis yang mirip pada tumbuhan. Kelompok bakteri ini memiliki klorofil a dan menggunakan dua fotosistem untuk memecah air, yang menghasilkan O₂ sebagai produk samping. Sebagian besar hidup di air tawar, akan tetapi ada juga spesies yang hidup di laut dan simbiosis yang hidup bersama dengan fungi sebagai lichen (lumut kerak). Beberapa spesies akuatik memfiksasi nitrogen: Dinding sel pada umumnya tebal dan bergelatin. Flagela tidak ada, bentuk motil bergerak dengan cara meluncur. Di antara Cyanobacteria ada yang berbentuk sel tunggal, membentuk koloni, dan organisme multiseluler yang memiliki suatu pembagian kerja yang khusus di antara sel-sel yang telah terspesialisasi. Beberapa contohnya : *Chaemosiphon* merupakan genus yang menghasilkan sejenis toksin bila tertelan bisa menyebabkan kematian bagi hewan yang menelannya; *Microcystis* berbentuk kokus, memiliki vakuola gas, dapat menyebabkan perairan menjadi toksik bila terjadi booming (jumlahnya sangat banyak); *Gloeotheca*, berbentuk kokus

berseludang dan pemfiksasi nitrogen; *Oscillatoria*, *Spirulina*, *Anabaena*, dan *Nostoc* merupakan Cyanobacteria sudah lama dikenal.

Aquificae

Kelompok bakteri ini adalah autotrof hidrogen. Group filogenetiknya terdiri atas bakteri-bakteri yang termasuk kelompok yang dikenal sebagai bakteri termofilik, dan merupakan satu cabang yang terdalam dari bakteri. Temperatur maksimum pertumbuhan dari beberapa spesies melebihi 95°C dan kelompok bakteri ini dapat dianggap sebagai hipertermofil. *Aquifex pyrophilus* adalah contoh bakteri hipertermofil yang tumbuh pada temperatur maksimum 95°C. Bakteri ini memfiksasi karbon dioksida melalui siklus reduksi asam sitrat dan menggunakan H₂ sebagai sumber energinya, juga menggunakan thiosulfat dan sulfur yang dioksidasi menjadi asam sulfat. Bakteri ini juga dapat menggunakan nitrat sebagai akseptor elektron dan menghasilkan nitrit dan gas N₂. *Hydrogenobacter* memiliki jalur metabolisme yang serupa melalui siklus reduksi asam trikarboksilat. Contoh lainnya *Desulfurobacterium* merupakan bakteri anaerob obligat yang berhasil diisolasi dari lubang hidrotermal laut dalam.

Thermotogae

Thermotoga adalah genus fermentatif yang terdiri dari beberapa anggota bakteri termofilik. Bakteri ini tumbuh pada temperatur dari 55°C sampai 90°C. Bakteri ini memiliki kandungan lipid selnya yang khas. *Thermotoga* memfermentasi gula seperti glukosa menjadi laktat, asetat, CO₂, dan H₂. Contoh lainnya *Thermosipho* tumbuh pada media yang diperkaya seperti ekstrak ragi dan membutuhkan asam amino cystein. Beberapa *Thermotoga* dapat bergerak dengan flagela tipe monotrikh.

Thermomicrobia

Contoh bakteri kelompok ini antara lain genus *Thermomicrobium*. Genus ini terdiri atas bakteri termofil berukuran kecil, berbentuk batang yang dapat tumbuh sebagai organisme heterotrof pada mata air panas dengan temperatur optimal untuk pertumbuhan antara 70 °C-75 °C. Dinding selnya mengandung sedikit asam diaminopelat.

Thermodesulfobacteria

Kelompok ini adalah kelompok bakteri termofilik yang mereduksi sulfat dan menggunakan laktat dan piruvat sebagai sumber energi serta thiosulfat atau sulfat sebagai

akseptor elektron. H_2S dibentuk melalui metabolisme reduksi sulfatnya. *Thermodesulfobacterium* merupakan satu-satunya genus dari filum ini. Kelompok bakteri ini berbentuk batang dan hidup di mata air panas dan di bawah permukaan tanah yang hangat pada sumber-sumber minyak.

Deinococcus-Thermus

Merupakan kelompok yang sangat kecil yang secara langsung diwakili oleh beberapa genera. Genus *Deinococcus* terdiri dari bakteri-bakteri gram positif. Walaupun demikian, bakteri-bakteri ini berbeda dengan bakteri gram positif lainnya, bakteri ini tahan terhadap radiasi gamma dan cahaya ultraviolet. *Thermus* terdiri dari bakteri termofilik berbentuk batang. Ornitin merupakan asam diamino di dalam dinding sel baik pada *Deinococcus* maupun *Thermus*.

Bacteroidetes

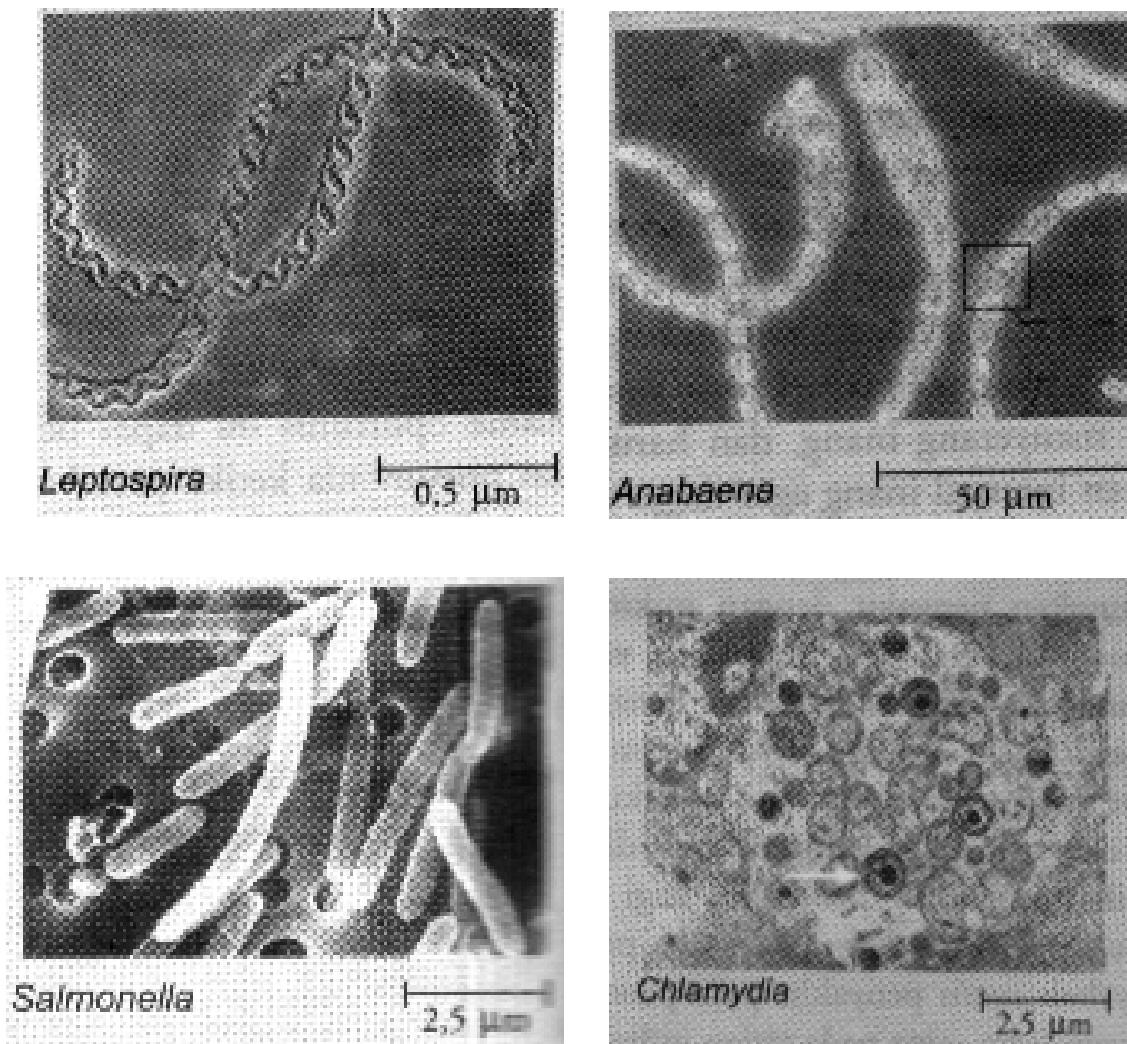
Filum ini merupakan satu kelompok yang beragam anggotanya, terdiri dari bakteri aerob dan anaerob heterotrof. Diantaranya adalah bakteri heterotrof yang mampu meluncur yang memiliki komposisi basa DNA yang rendah (sekitar 30-40 mol% G+C). Contohnya: kelompok *Cytophaga-Flavobacterium* yang bersifat aerobik atau aerobik fakultatif dan bergerak dengan cara meluncur. Sedangkan yang bersifat anaerob fermentatif dan tidak bergerak diwakili oleh kelompok *Bacteroides*. *Saprospira* tumbuh memanjang multiseluler dengan filamen berbentuk helik.

Planctomycetes

Bakteri dari kelompok Planctomycetes adalah bakteri yang mampu membentuk kuncup (budding), uniseluler atau filamen. Bakteri dari filum ini tidak memiliki peptidoglikan dan bersifat heterotrof. *Pirellula*, genus yang tidak memiliki tangkai dan kebanyakan memiliki flagel pada salah satu sisi tubuhnya. *Gemmata*, tidak bertangkai dan memiliki flagela peritrich. *Planctomyces* memiliki tangkai dan memiliki flagel pada salah satu sisi tubuhnya. Ketiga genus tersebut memiliki fase motil (gerak) dan sessil pada siklus hidupnya. Contoh lain adalah genus *Isophaera*, bakteri ini berbeda dengan tiga genus lainnya. Berbentuk filamen yang dapat meluncur dan ditemukan pada sumber mata air panas.

Chlamydiae

Parasit intraseluler obligat pada hewan; mendapatkan semua ATP-nya dari sel-sel inang; dinding sel gram-negatif, akan tetapi tidak umum di antara bakteri karena tidak memiliki **peptidoglikan**. *Chlamydia trachomatis* adalah penyebab kebutaan yang paling umum di dunia dan juga penyebab paling umum penyakit yang ditularkan secara seksual (*nongonococcal urothritis*) di Amerika Serikat. *C. pneumoniae* tidak hanya menyebabkan pneumonia tetapi juga kerusakan pada jantung.



Gambar 6.1.3 *Leptospira* merupakan genus dari filum Spirochaeta, salah spesienya merupakan penyebab penyakit **leptospirosis**. *Anabaena* wakil dari Cyanobacteria yang memiliki kemampuan berfotosintesis seperti tumbuhan. *Salmonella* merupakan bakteri kemoheterotrof dari filum Proteobacteria yang dapat menyebabkan keracunan dari makanan. *Chlamydia* merupakan genus bakteri yang bersifat parasit intraseluler obligat.

Verrumicrobia

Kelompok bakteri ini memiliki karakteristik yang tidak umum, beberapa anggotanya memiliki gen-gen untuk mensintesis tubulin. Sangat sedikit dari filum ini yang berhasil diisolasi dalam kultur murni, meskipun anggota filum ini menempati sampai 3% dari mikrobiota tanah. Habitat kelompok ini selain di tanah juga diperairan. *Prostheco bacter* dan *Verrucomicrobium*, merupakan contoh dari kelompok ini, bersifat heterotrof dan keduanya hidup diperairan. Sedangkan *Xiphinematobacter* mampu membuat mikrotubul dan hidup bersimbion.

Spirochaetes

Spirochaetes secara morfologi berbeda dari bakteri lain. Selnya fleksibel berbentuk heliks, kadang-kadang sangat panjang (sampai 0,25 mm panjangnya, akan tetapi terlalu tipis untuk dapat dilihat tanpa mikroskop). Bersifat kemoheterotrof. Perputaran filamen internal mirip flagela, disebut sebagai **filamen aksial**, sehingga menghasilkan gerakan seperti pembuka sumbat botol. Anggota filum ini ada yang hidup bebas dan bersifat patogen seperti *Treponema pallidum* hidup di dalam mulut, saluran pencernaan, dan di daerah alat kelamin (penyebab sifilis) pada manusia dan hewan; *Borrelia burgdorferi* (penyebab penyakit Lyme); *Leptospira*, dari genus ini ada yang hidup bebas (*L. biflexa*) dan yang bersifat patogen (*L. interrogans*, penyebab penyakit **leptospirosis**). Contoh kelompok ini yang hidup bebas adalah *Spirochaeta*, genus ini bersifat anaerob dan anaerob fakultatif, habitatnya di perairan tawar dan laut.

Fibrobacteres

Kelompok ini merupakan bakteri anaerob. Beberapa dari Fibrobacteres hidup di dalam saluran pencernaan hewan. Beberapa spesies mendegradasi selulosa. Spesies dari *Fibrobacter* merupakan bakteri anaerob gram negatif, berbentuk batang. *F. succinogenes*, bakteri ini hidup di dalam rumen hewan-hewan ruminansia, fermentasi dari gula untuk menghasilkan asam lemak volatil mencakup asam asetat, propionat, dan suksinat akan diserap oleh tubuh hewan. Asam lemak yang mudah menguap tersebut (volatil) yang diserap di dalam rumen akan digunakan oleh hewan ruminansia sebagai sumber karbon dan energi, sedangkan organisme yang kaya akan protein (bakteri) masuk ke dalam usus kecil, di tempat inilah bakteri-bakteri tersebut akan diuraikan sebagai sumber nitrogen bagi hewan.

Acidobacteria

Bakteri ini biasa ditemukan di dalam tanah dan sedimen, tetapi sedikit strain yang sudah dikultur. Bakteri ini adalah bakteri gram negatif jika diekstrak bakteri ini memiliki 16S rDNA dari DNA-nya. Bakteri kelompok ini diduga banyak ditemukan pada berbagai habitat tanah seperti pertanian, hutan, gurun, dan padang rumput. *Acidobacterium capsulatus* merupakan satu-satunya dari filum ini yang dapat dikultur murni. Spesies ini merupakan bakteri berbentuk batang dengan figmen orange. Sel-selnya mengandung menaquinon sebagai satu-satunya menaquinon membran yang dimiliki oleh bakteri.

Fusobacteria

Bakteri anaerob obligat ini adalah bakteri yang biasanya ditemukan di dalam rongga mulut dan pencernaan hewan. Genus *Fusobacterium* terdiri dari organisme anaerob uniseluler yang berbentuk batang dan kadang-kadang sel-selnya berbentuk spindel. Kelompok ini tidak bergerak dan bersifat fermentatif. Produk akhir hasil fermentasinya adalah butir-butir bersama-sama asetat, laktat, dan sejumlah kecil propionat, suksinat, dan format. Bakteri ini hidup di dalam mulut, usus, dan saluran kelamin hewan. Genus lainnya adalah *Propionigenium* dan *Leptotrichia* yang produk akhir fermentasinya adalah asam propionat dan asam laktat. Bakteri dari genus ini ditemukan dalam rongga mulut hewan.

Dictyoglomi

Spesies dari kelompok ini bersifat termofilik dan merupakan bakteri fermentatif anaerob obligat. Filum ini diberi nama dari genus *Dictyoglomus* yang berbentuk batang memanjang. Bakteri ini tumbuh di sumber mata air panas yang alkali. Temperatur pertumbuhannya berkisar antara 50°C sampai 80°C. Bakteri ini adalah bakteri fermentatif yang menggunakan berbagai jenis gula sebagai sumber energi untuk pertumbuhannya.

Latihan

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai sistematika Domain Bacteria, silakan Anda kerjakan latihan berikut ini.

1. Coba Anda jelaskan peranan Prokariota dalam kehidupan !

2. Domain Bacteria merupakan salah satu domain penting dari organisma. Coba Anda jelaskan pembagian bakteri berdasarkan cara memperoleh energi dan sumber karbonnya !
3. Jelaskan perbedaan antara bakteri Gram positif dan bakteri Gram negatif !
4. Coba Anda sebutkan beberapa bakteri yang menguntungkan dan merugikan secara langsung bagi manusia,
5. Jelaskan dengan singkat ciri khusus dari filum :
 - a. Firmicutes
 - b. Chlorobi
 - c. Cyanobacteria
 - d. Thermotogae
 - c. Verrumicrobia

Petunjuk Jawaban Latihan

Jika Anda menemui kesulitan dalam menjawab soal latihan tersebut di atas, gunakanlah petunjuk berikut ini.

1. Seperti yang sudah Anda pelajari bahwa Prokariota terdiri atas domain Bacteria dan Archaea yang berukuran sangat kecil (mikroskopis) memiliki peran dan fungsi yang sangat penting bagi lingkungan. Sebagai contoh Perombakan bahan-bahan dari organisma yang sudah mati dan mengembalikannya unsur-unsur kimiawi yang penting ke lingkungan dalam bentuk senyawa anorganik yang diperlukan oleh tumbuhan, sedangkan tumbuhan merupakan makanan bagi kelompok hewan pemakan tumbuhan. Masih banyaknya contoh lainnya yang bisa Anda kemukakan, seperti halnya beberapa bakteri yang bersimbiosis dengan tanaman Legum atau tanaman lainnya.
2. Bila Anda masih belum paham, silakan Anda telaah kembali tentang bagaimana bakteri memperoleh sumber karbon dan energinya. Jangan Anda lupakan 4 konsep utama yang berkaitan dengan cara memperoleh nutrisi pada bakteri seperti Fotoautotrof, Kemoautotrof, Fotoheterotrof, dan Kemoheterotrof.
3. Anda masih ingatkan dengan konsep Gram positif dan Gram negatif yang berkaitan erat dengan teknik pewarnaan yang dikembangkan H.C. Gram dan sangat erat kaitannya dengan struktur dinding sel bakteri. Dikatakan bahwa bila dinding selnya banyak mengandung peptidoglikan maka akan menyerap warna violet sehingga bakteri ini dikategorikan sebagai bakteri Gram positif dan sebaliknya bila kandungan peptidoglikan

pada dinding sel bakteri sedikit maka zat warna violet yang digunakan dalam perwarnaan akan mudah dibilas sehingga dikategorikan sebagai bakteri Gram negatif

4. Masih Anda ingat bakteri-bakteri yang dapat bersimbiosis dengan tumbuhan legum seperti *Rhizobium* dan *Agrobacterium*, juga kelompok bakteri dari filum Actinobacteria dari genus *Streptomyces* yang menghasilkan berbagai macam antibiotik. Dan masih banyak contoh-contoh bakteri yang dapat memberikan manfaat yang sangat besar khususnya pada manusia.
5. a. Firmicutes, mayoritas terdiri dari bakteri gram positif yang memiliki mol % G+C yang rendah.
 - b. Chlorobi merupakan bakteri sulfur hijau yang melakukan fotosintesis tanpa menghasilkan oksigen.
 - c.. Cyanobacteria merupakan kelompok bakteri yang bersifat fotoautotrof dengan fotosintesis yang mirip pada tumbuhan, bakteri ini memiliki klorofil a dan menggunakan dua fotosistem untuk memecah air.
 - d. Thermotogae merupakan bakteri termofilik dan merupakan bakteri fermentatif.
 - c. Verrucomicrobia merupakan kelompok bakteri yang memiliki gen-gen pembentuk tubulin

Rangkuman

Prokariot terdiri dari dua domain besar organisme yang dikenal dengan domain Bacteria dan Archaea. Dua domain ini memiliki kesamaan dalam struktur umum selnya, yaitu keduanya tidak memiliki sistem endomembran.

Bacteria berdasarkan cara memperoleh nutrisi pokoknya terbagi menjadi bakteri: fotoautotrof, kemoautotrof, fotoheterotrof, dan kemoheterotrof. Bakteri **fotoautotrof** adalah bakteri fotosintetik yang memanfaatkan energi cahaya untuk menjalankan sintesis senyawa organik dari karbon dioksida (CO₂). Alat metabolisme yang dikhususkan pada organisme ini adalah membran internal dengan sistem pigmen yang menangkap cahaya. Pada bakteri fotoautotrof obligat, bakteri hanya tumbuh jika tersedia cahaya dan CO₂. Bakteri fotoautotrof obligat menggunakan senyawa anorganik seperti H₂O, H₂, atau H₂S sebagai donor elektron untuk mereduksi CO₂ menjadi komponen karbon sel (CH₂O). Bakteri **kemoautotrof** merupakan bakteri yang hanya memerlukan karbon dioksida sebagai sumber karbon, tetapi tidak menggunakan cahaya sebagai sumber energi, bakteri ini mendapatkan energi dengan cara

mengoksidasi bahan-bahan anorganik. Energi kimia diekstraksi dari hydrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), ion fero (Fe^{2+}) atau beberapa bahan kimia lain, tergantung pada spesiesnya. Pada bakteri kemoautotrof aerobik menggunakan O_2 sebagai akseptor elektron terakhir. Bakteri **fotoheterotrof** merupakan yang tumbuh melalui fotosintesis, dapat menggunakan cahaya untuk menghasilkan ATP, tetapi harus menggunakan karbon dalam bentuk organik. Cara memperoleh nutrisi seperti ini hanya terbatas pada bakteri tertentu. Biasanya, organisme dalam kelompok ini membutuhkan faktor pertumbuhan seperti vitamin B, dan beberapa spesies dapat tumbuh pada substrat organik jika tersedia oksigen. Sedangkan bakteri **kemoheterotrof** merupakan bakteri yang harus mengkonsumsi molekul organik untuk sumber energi dan karbon. Cara memperoleh nutrisi seperti ini banyak ditemukan pada berbagai organisme. Substrat yang menjadi sumber nutrisinya bisa berupa glukosa atau suksinat, atau sumber karbon dan energi lainnya yang mungkin berbeda.

Bakteri pun berdasarkan pada struktur dinding selnya dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok yaitu bakteri **Gram positif** dan **Gram negatif**. Berdasarkan sifat dari dinding sel bakteri tersebut, telah dikembangkan suatu metode pewarnaan oleh **Hans Christian Gram**, seorang dokter Denmark, pada akhir tahun 1800-an. Bakteri Gram positif merupakan bakteri yang mengandung peptidoglikan dalam jumlah besar pada dinding selnya. Sedangkan bakteri Gram negatif memiliki lebih sedikit peptidoglikan yang terletak pada daerah Gel periplasmik yang terletak antara membran plasma dan suatu membran dibagian luar.

Secara filogenetik domain Bacteria terdiri dari 20 filum yaitu : Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria, Chloroflexi, Chlorobi, Cyanobacteria, Aquificae, Thermotogae, Thermomicrobia, Thermodesulfobacteria, Deinococcus-Thermus, Bacteroidetes, Planctomycetes, Chlamydiae, Verrucomicrobia, Spirochaetes, Fibrobacteres, Acidobacteria, Fusobacteria, dan Dictyoglomi.

Tes Formatif

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat.

1. Bacteria berbeda dengan dua domain lainnya Archaea dan Eucarya. Dari struktur pelindung selnya yang membedakan Bacteria dari Archaea dan Eucarya adalah ditemukan tidaknya komponen ...
 - a. peptidoglikan
 - b. asam amino
 - c. lipida
 - d. glukosa

2. Proteobacteria yang banyak bermanfaat dalam bidang pertanian adalah dari genus ...
 - a. *Rhizobium* dan *Pseudomonas*
 - b. *Pseudomonas* dan *Agrobacterium*
 - c. *Agrobacterium* dan *Bdellovibrio*
 - d. *Agrobacterium* dan *Rhizobium*

3. *Mycobacterium tuberculosis* merupakan bakteri patogen Gram positif. Bakteri ini termasuk pada filum...
 - a. Actinobacteria
 - b. Chloroflexi
 - c. Chlorobi
 - d. Aquificae

4. Jalur fiksasi CO₂ yang khas ditemukan pada filum Chloroflexi. Jalur fiksasi CO₂ pada filum ini dikenal serbagai jalur ...
 - a. siklus Calvin-Benson
 - b. reduksi TCA
 - c. Hidropropionat
 - d. siklus asam Trikarboksilat

5. Kelompok ini merupakan bakteri autotrof hidrogen dan dikenal juga sebagai bakteri termofilik, dan beberapa anggotanya termasuk hipertermofil, kelompok ini adalah ...
 - a. Aquificae
 - b. Thermotogae

- c. Thermomicrobia
 - d. Thermodesulfobacteria
6. Pada dinding selnya ditemukan adanya **ornitin** dan termasuk bakteri Gram positif. Contoh dari kelompok bakteri ini adalah ...
- a. *Deinococcus*
 - b. *Thermomicrobium*
 - c. *Desulfurobacterium*
 - d. *Thermodesulfobacterium*
7. Filum di bawah ini yang anggotanya bersifat parasit intraseluler obligat adalah ...
- a. Bacteroidetes
 - b. Planctomyces
 - c. Chlamydiae
 - d. Verrumicrobia
8. Bakteri penyebab penyakit **Leptospirosis** termasuk pada filum ...
- a. Spirochaetes
 - b. Fibrobacteres
 - c. Acidobacteria
 - d. Bacteroidetes
9. Bakteri ini bersifat termofilik fermentatif, tumbuh di mata air panas yang menggunakan berbagai jenis gula sebagai sumber energi untuk pertumbuhannya. Bakteri tersebut adalah ...
- a. *Acidobacterium*
 - b. *Burrelia*
 - c. *Treponema*
 - d. *Dictyoglomus*
10. Bakteri yang berperan penting dalam membantu proses pencernaan pada hewan memamahbiak (ruminansia) berasal dari filum ...
- a. Fusobacteria
 - b. Dictyoglomi

- c. Fibrobacteres
- d. Acidobacteria

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

Rumus :

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{jumlah jawaban Anda yang benar}}{10} \times 100\%$$

Arti singkat penguasaan yang Anda capai :

- 90 – 100 % = baik sekali
- 80 – 89 % = baik
- 70 – 79 % = cukup
- < 70 % = kurang

Bila Anda mencapai tingkat penguasaan 80 % atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan kegiatan belajar selanjutnya. **Bagus !** Akan tetapi apabila tingkat penguasaan Anda masih di bawah 80 %. Anda harus mengulangi kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum Anda kuasai.