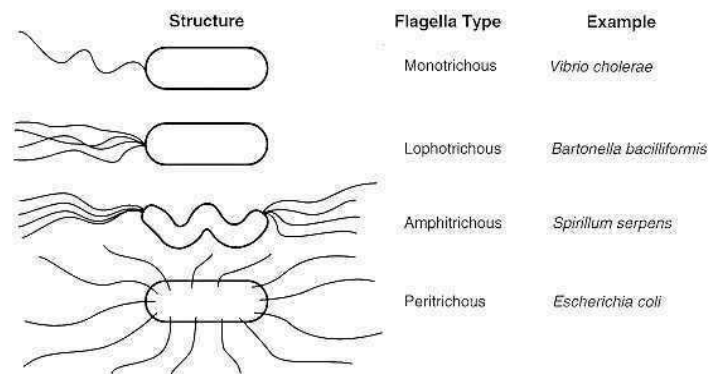


1. Flagela dan Filamen Axial

Flagela merupakan filamen protein uliran (helical) dengan panjang dan diameter yang sama, dimiliki oleh beberapa bakteri patogen untuk bergerak bebas dan cepat (pergerakan berenang). Flagela disusun oleh tiga bagian: filamen, hook (sudut), dan basal body (bagian dasar). Bagian dasar menancap pada membran plasma, disusun oleh suatu tangkai serta satu atau dua rangkaian cincin yang mengelilinginya dan berhubungan dengan membran plasma, peptidoglikan, dan pada bakteri Gram-negatif berhubungan dengan membran luar pembungkus sel.

Berdasarkan jumlah dan lokasi pelekatan flagela, tipe flagela pada sel bakteri menampakkan bentuk yang khas. Beberapa jenis bakteri seperti pada *Pseudomonas* memiliki satu flagela pada bagian salah satu ujung sel yang disebut monotrik. Tipe flagela yang tersusun atas banyak flagela yang letaknya pada satu ujung sel dikenal sebagai tipe lofotrik, sedangkan apabila letak flagella pada kedua ujung sel dinamakan tipe amfitrik. Kelompok enterobakteri motil seperti *Salmonella* atau *Bacillus* memiliki flagela yang tersebar pada seluruh permukaan sel, yang disebut peritrik. Jumlah flagela setiap jenis bakteri berbeda mulai dari sejumlah kecil pada *Escherichia coli* sampai beberapa ratus per sel, seperti pada *Proteus*.



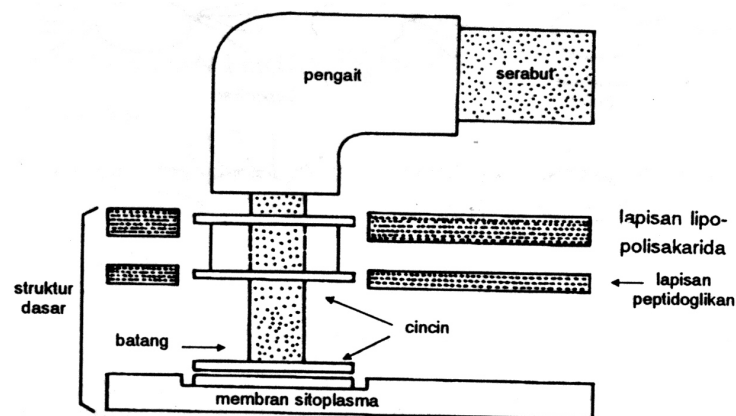
Gambar 3.5. Beberapa tipe flagella pada sel bakteri
(Sumber: Milton R.J. Salton dan Kwang-Shin Kim, 2001)

Fungsi utama flagela pada bakteri adalah sebagai alat untuk pergerakan. Flagela bukan merupakan alat untuk pertahanan hidup. Flagela dapat dipisahkan dengan guncangan atau dengan putaran dalam alat pengocok seperti sentrifuga. Sel

tetap hidup dan memperoleh motilitas dengan pertumbuhan kembali flagela. Sel bakteri berflagela dapat menghampiri sumber nutrisi dan menghindari racun dengan menghampiri suatu kemoatraktan atau meninggalkan senyawa yang tidak diinginkan.

Pergerakan sel oleh flagela mendorong sel dengan putaran melingkar searah sumbu panjangnya, seperti baling-baling. Putaran flagela dikuatkan oleh arus listrik. Fungsi flagela dibangun oleh respon kemotaktik, menunjukkan suatu sistem regulasi sensori umpan balik. Flagela ganda memutar berlawanan dengan arah jarum jam untuk membentuk suatu berkas yang terkoordinir dan efek pergerakan sel umumnya ke arah nutrisi (kemotaksis positif). Pengaruh adanya senyawa yang tidak diinginkan, menyebabkan koordinasi menjadi hilang, berkas flagela mengalami kekacauan, dan sel berputar dan cenderung menjauhi senyawa tersebut. Koordinasi fungsi flagela melibatkan kemoreseptor, yang disebut “protein pengikat periplasmik”, yang berinteraksi dalam transpor membran. Koordinasi pergerakan flagela juga melibatkan proses metilasi suatu protein membran plasma spesifik. Adanya kemoatraktan, proses metilasi protein tersebut meningkat, sebaliknya dengan adanya racun/senyawa yang tidak diinginkan, proses metilasi menurun.

Pada beberapa kelompok bakteri spiroket seperti *Treponema*, *Leptospira*, dan *Borrelia*, bergerak dengan suatu gelombang uliran berjalan, suatu tipe gerakan sel untuk menembus medium kental. Bakteri tersebut memiliki filamen axial yang serupa flagela yang melilit mengelilingi sel. Filamen tersebut terdapat dalam daerah periplasma di antara membran luar dan membran dalam sel. *Treponema microdentium* membentuk dua filamen dalam setaip selnya, *T. reiteri* membentuk enam sampai delapan, dan beberapa spesies membentuk lebih banyak filamen.



Gambar 3.6 Struktur flagela bakteri (Sumber: Nester (1973) dalam

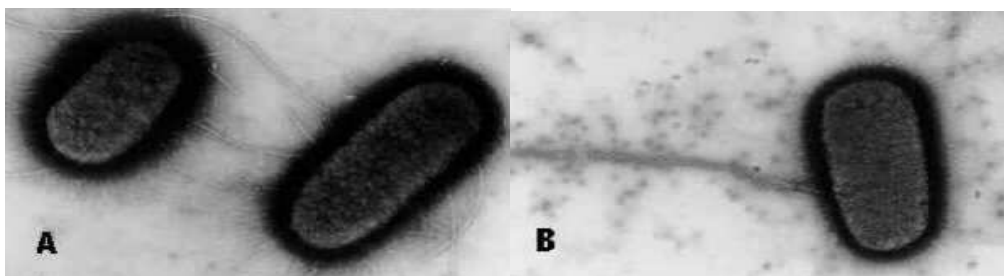
2. Mikrofibril: Fimbria dan Pili Seks (Adhesin, Lektin, Evasin, dan Agresin)

Fimbria, disebut jua pili dapat diamati dengan mikroskop elektron pada permukaan beberapa jenis sel bakteri. Fimbria merupakan mikrofibril serupa rambut berukuran 0,004 – 0,008 μm .. Fimbria lebih lurus, lebih tipis dan lebih pendek dibandingkan dengan flagela. Struktur fimbria serupa dengan flagela, disusun oleh gabungan monomer, membentuk rantai yang berasal dari membran plasma. Salah satu bakteri yang memiliki banyak fimbria, dapat menginfeksi saluran urin. Sel berfimbria melekat kepada ruang antar sel, permukaan hidrofobik, dan reseptor spesifik. Fungsi fimbria dianggap membantu bakteri untuk bertahan hidup dan berinteraksi dengan inang. Fungsi fimbria, di antara komponen permukaan sel bakteri yang lainnya, dapat dianggap memiliki aktivitas fungsional seperti adhesin, lektin, evasin, agresin, dan pili seks. Pada bakteri patogen yang menyebabkan infeksi, fimbria dan komponen permukaan lainnya dapat berperan sebagai faktor pelekat spesifik, yang disebut adhesin. Spesifisitas perlekatan fimbria dapat menyebabkan bakteri menempel dan berkoloni pada jaringan inang spesifik. Fimbria 987P, K88, K99 pada strain *E. coli* enteropatogen (penyebab diare) berfungsi untuk kolonisasi dalam usus babi dan anak sapi.

Pada beberapa jenis bakteri, permukaan sel memiliki protein membran. Protein membran pada *Streptococcus pyogenes* grup A, diketahui sebagai faktor virulensi, berperan sebagai faktor pelekat (adhesin) pada proses kolonisasi pada faring, perlekatan tidak terjadi jika protein membran dinetralisasi oleh antiserum spesifik, dapat mencegah fagositosis (berperan sebagai suatu evasin) dan akhirnya berperan sebagai leukosidal (berperan sebagai agresin atau toxin). Fimbria lain yang masuk kelompok protein disebut lektin, ditemukan pada hewan dan tumbuhan, yang berikatan dengan gula spesifik pada permukaan sel. Sebagai contoh, perlekatan fimbria *E. coli* dan *Shigella flexneri* terhadap sel darah merah dan jaringan (epitel usus) secara spesifik dihambat oleh D-manosa dan D-metilmanosida. Pada beberapa jenis bakteri seperti pada *Pseudomonas aeruginosa* memiliki fimbria spesifik untuk mengikat metil-D-galaktosa, L-fruktosa atau D-mannosa pada *Vibrio cholerae* dan suatu oligosakarida mengandung D-galaktosa pada *Neisseria gonorrhoeae*.

Fimbria strain *N. gonorrhoeae* yang berbeda memperlihatkan variasi antigenik yang sangat besar. Hal ini terjadi karena variasi unit monomer fimbria yang disusun oleh domain peptida terminal antigenik variabel dan menyimpan suatu domain peptida non-antigenik., domain peptida non-antigenik dapat bersifat antigenik hanya pada saat diisolasi dengan senyawa kimia. Variabilitas antigenik dari fimbria gonococcus nampaknya merupakan tipe lain dari fenomena penolakan sistem imun inang melalui variasi antigenik parasit. Berdasarkan hal tersebut, fimbria gonococcus disebut evasin.

Mikrofibril bakteri Gram-negatif, sering disebut pili umum (fimbria) atau sebagai pili seks. Mikrofibril terdapat secara bebas atau secara simultan pada sel yang sama. Pada permukaan sel tersebar sekitar 100 – 200 fimbria, hanya 1- 4 pili seks ditemukan pada daerah tertentu. Pili seks berfungsi untuk mendeteksi adanya antigen spesifik atau diduga untuk meng-inaktifkan bakteriofaga tertentu, yang menempel secara spesifik pada pili seks. Faga RNA spesifik menempel sepanjang filamen pili seks, sedangkan faga DNA berbentuk filamen menempel pada ujung pili. Struktur mikrofibril juga dapat dilibatkan dalam meluncur dan gerak kedutan lambat pada bakteri yang tidak berflagel (translokasi permukaan).



Gambar 3.7 (A) Pengamatan mikroskop electron struktur pili yang nampak berbeda dari flagela pada bakteri *E. coli* (B) pili seks pada bakteri *E. coli* ketika konjugasi antar dua sel (Sumber: Milton R.J. Salton dan Kwang-Shin Kim, 2001)

3. Selubung Sel

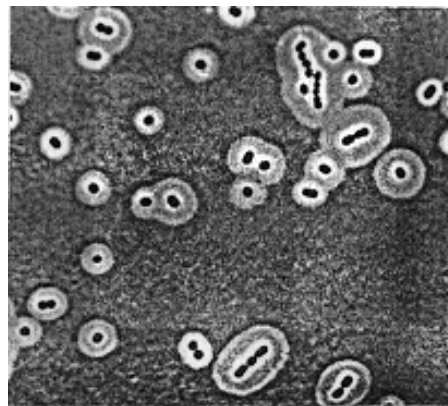
Selubung sel bakteri terdiri dari membran plasma, dinding sel serta protein khusus atau polisakarida dan beberapa bahan pelekat luar. Komponen selubung sel sebagai lapisan pelindung yang tersusun atas beberapa lapis sel yang umum terdapat pada sel bakteri, tersusun dari 20% atau lebih dari berat kering sel. Selubung sel bakteri mengandung daerah transpor untuk nutrisi dan daerah reseptor untuk virus

bakteri dan bakteriosin, mempermudah interaksi inang-parasit, disamping itu sebagai tempat reaksi komplemen dan antibodi, dan sering mengandung komponen toksik untuk inang.

4. Kapsul

Virulensi patogen sering berhubungan dengan produksi kapsul. Strain virulen *Pneumococcus* menghasilkan polimer kapsuler yang melindungi bakteri dari fagositosis. Bakteri tersebut membentuk koloni mukoid atau cair (tipe M) atau koloni halus (tipe S) pada medium padat dan sebaliknya strain kasar (tipe R) tidak membentuk kapsul. Hilangnya kemampuan untuk membentuk kapsul melalui mutasi berhubungan dengan kehilangan virulensi dan kerusakan oleh fagosit tapi tidak mempengaruhi kelangsungan hidup bakteri.

Bentuk kapsul yang kental yang cenderung melekat kepada sel, sedangkan lendir dan polimer ekstraseluler lebih mudah tercuci. Kapsul lebih mudah dilihat dengan pewarnaan negatif. Di bawah mikroskop, dalam campuran tinta India kapsul kelihatan lebih terang mengelilingi sel. Kapsul juga dapat diwarnai secara khusus. Sel bakteri yang tidak membentuk kapsul dan secara serologi dapat bereaksi dengan serum antikapsul, dikatakan menghasilkan mikrokapsul.



Gambar 3.8. Struktur kapsul pada sel bakteri dilihat dengan mikroskop cahaya

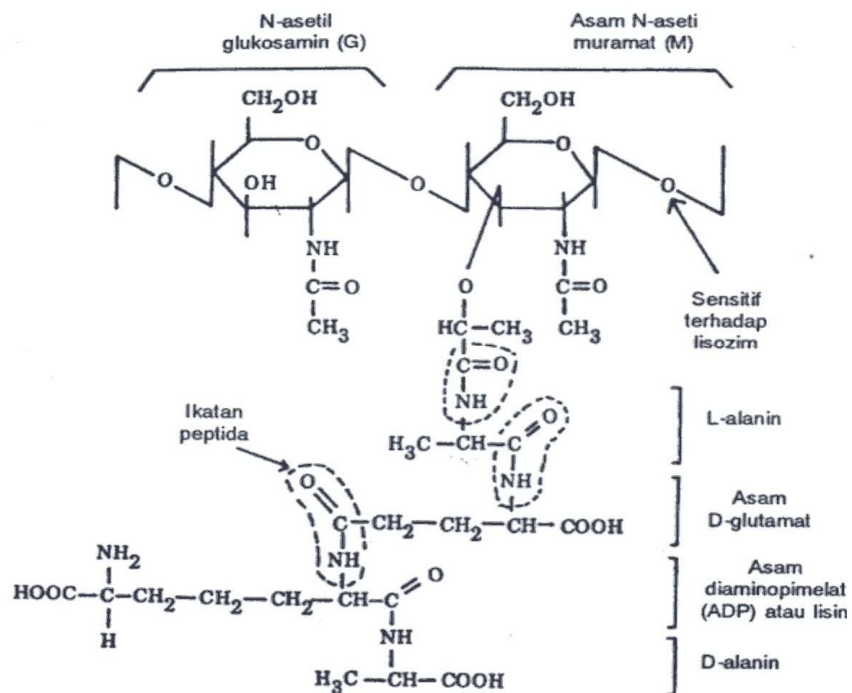
(Sumber: Todar,K.,2001)

5. Dinding Sel

Dinding sel, ditemukan pada semua bakteri hidup bebas kecuali pada *Mycoplasma*. Dinding sel berfungsi melindungi kerusakan sel dari lingkungan bertekanan osmotik rendah dan memelihara bentuk sel. Hal ini dapat diperlihatkan

melalui plasmolisis, dengan mengisolasi partikel selubung sel setelah sel bakteri mengalami kerusakan secara mekanik, atau dengan penghancuran oleh lisozim. Jika seluruh sel atau selubung sel diisolasi kemudian diberi lisozim, partikel dinding sel bakteri (bukan archaebakteria) dapat lisi dengan perlakuan lisozim tersebut dan membentuk protoplas (Bakteri Gram positif) dan spheroplas (Bakteri Gram negatif).

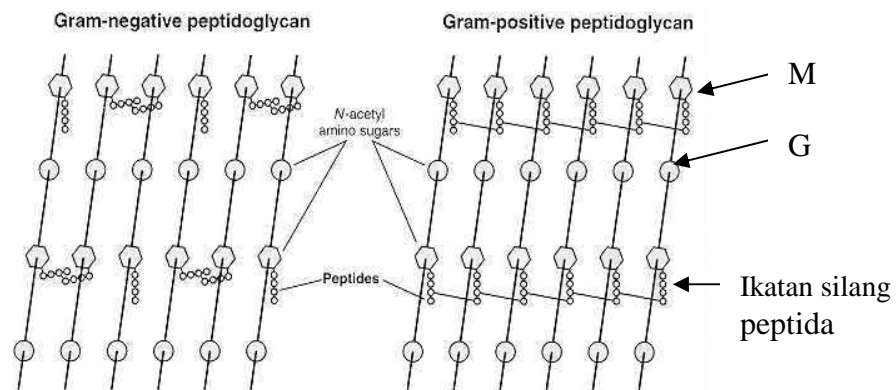
Komponen kaku dinding sel eubakteria patogen adalah suatu makromolekul raksasa berbentuk kantung tunggal atau sakulus, disusun oleh jaringan hubungan-lintas peptidoglikan (murein). Murein dan komponen yang berhubungan terdapat sekitar 2-40% dari berat kering sel. Komponen glikan disusun oleh dua gula amino, glukosamin dan asam muramat. Struktur glikan terdapat secara berselang-seling sebagai residu (-1,4 linked N-asetil-D-glukosamin (G) dan asam N-asetil-D-muramat (M). Rantai tersebut bervariasi dari 10 sampai 170 unit disakarida. Unit peptida dan glikan tersebut terikat pada gugus karboksil asam laktat dari M kepada ujung amino suatu tetrapeptida. Glikotetrapeptida tersebut dihubungkan-lintas (cross-linked) melalui unit tetrapeptida, membentuk kerangka yang berkesinambungan. Gambaran yang sama pada komponen tetrapeptida adalah adanya D-alanin, yang selalu mengikat unit di antara rantai peptidoglikan.



Gambar 3.9 Struktur peptidoglikan pada bakteri *E. coli* . Tipe ini ditemukan pada

umumnya bakteri Gram negatif. Rangka utama glikan merupakan polimer dari dua gula asam amino N-asetilglukosamin (G) dan asam N-asetilmuramat (M) (a). Pada M terikat tetrapeptida terdiri dari L-ala-D-glu-ADP-D-ala (Sumber: Brock & Madigan, 1991)

Komponen peptida terikat-asam muramat pada beberapa bakteri adalah tetrapeptida -L-Ala-D-iso-Glu-meso DADP (atau L-Lys)-D-Ala. Hubungan-lintas di antara dua rantai peptidoglikan dapat dilihat pada Gambar 3.9 atau melalui suatu letak jembatan peptida (Gambar 3.10). Pada gambar tersebut mewakili struktur peptidoglikan bakteri *E. coli* dan semua eubakteria Gram-negatif termasuk tipe A, sedangkan *S. aureus*, *Streptococcus*, dan eubakteria Gram-positif lainnya menyempurnakan hubungan-lintas melalui suatu letak jembatan peptida yang dapat disusun oleh satu atau beberapa residu asam amino. Hubungan-lintas langsung pada *E. coli* tersebut dapat melalui -D-Ala-ADP- atau -ADP-ADP-, sedangkan organisme gram-positif, hubungan-lintas terjadi melalui D-Ala (asam amino)n-L-Lys-jembatan lintas tetapi pada beberapa organisme dapat juga termasuk hubungan-lintas melalui jembatan diamin melalui asam isoglutamat, vis, iso-D-Glu(NH-diamin-NH)-D-Ala. Lebih lanjut modifikasi termasuk perubahan residu D-alanin terminal dari tetrapeptida secara in vivo seperti pada *E. coli*., atau perubahan unit peptida dari rantai glikan. Kejadian ini pada *E. coli* dan *Micrococcus luteus*, dimana setengah atau lebih rantai glikan tidak berhubungan-lintas dan dapat bebas dari bagian atau semua unit tetrapeptida tersebut. Oleh karena itu, ikatan-lintas peptidoglikan pada mikroba tersebut hanya sekitar 30-70%. Sebaliknya, glikan *S. aureus* menyimpan semua unit tetrapeptidanya, yang secara lengkap berhubungan-lintas. Sebagai tambahan untuk variasi hubungan-lintas, variasi terjadi dengan adanya polipeptida terikat-peptidoglikan, polisakarida, atau protein. Pada *E. coli* dan bakteri gram-negatif, lipoprotein dibentuk dan *E. coli* berbentuk bola menghasilkan peptidoglikan serupa. Rantai glikan cenderung menjadi lurus mengelilingi sel, sebaliknya pada arah longitudinal dari hubungan-lintas unit tetrapeptida. *E. coli* mengandung 106 pengulangan unit tetrapeptida-disakarida, atau cukup untuk dua atau tiga lapisan peptidoglikan. Suatu sel gram-positif, dapat mengandung peptidoglikan sebanyak 20 kali, cukup untuk 40 lapisan atau lebih.



Gambar 3.10 Struktur peptidoglikan pada bakteri Gram negatif dan bakteri Gram positif (G=N-asetilglukosamin dan M=asam N-asetil muramat) (Sumber: Todar,K.,2001).

6. Perbedaan Sel Bakteri Gram-positif dengan Gram-negatif

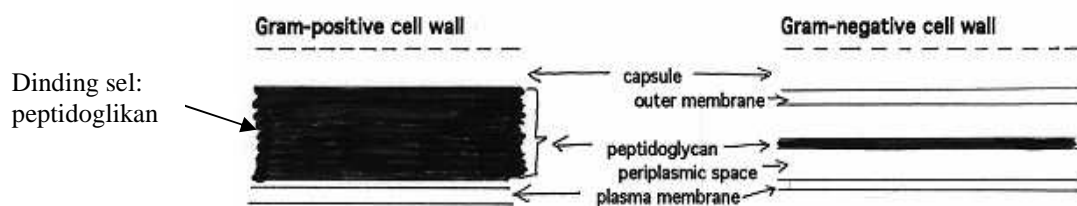
Kelompok Bakteri Gram-positif dapat menghasilkan polisakarida permukaan yang spesifik (10-50% dari dinding sel) dan protein yang berhubungan dengan peptidoglikan. Polisakarida yang sangat dikenal adalah asam teikoat (biasanya mengandung ribitol dan kadang-kadang gliserol), sejumlah senyawa kapsul *Pneumococcus*, dan polisakarida kelompok *Streptococcus*. Polimer asam poli-D-glutamat dihasilkan oleh beberapa spesies *Bacillus*, dan protein membran *Streptococcus* grupA merupakan suatu faktor virulensi.

Membran sel bakteri yang tersusun oleh asam lipoteikoat (LTAs) merupakan polimer gliserolfosfat yang berakhir pada glikolipid, yang menembus membran sitoplasma. Asam teikuronat (TAs) merupakan polimer yang terdiri dari N-asetilgalaktosamin (galNac) dan asam glukuronat (GlcUA), terikat sebagai unit pengulangan disakarida (GlcUA (1,3 (GalNac)_n). TAs tidak mengandung fosfat, tetapi terdapat sebagai polimer polianionik bersifat asam disebabkan karboksil dari asam uronat. TAs berikatan melalui N-asetilglukosamin-1- fosfodiester kepada grup hidroksil C-6 asam muramat. Asam teikuronat dapat ditemukan pada sel bersama dengan asam teikoat; asam teikuronat disintesis ketika sel kehilangan fosfat, untuk membuat asam teikoat.

Di bawah mikroskop elektron, irisan melintang sel Gram-positif, dinding sel

sebagai lapisan di atas membran plasma yang relatif tebal, yang sensitif terhadap lisozim. Protein dan polisakarida, menyokong lapisan substruktur dinding sel. Protein membran tipe-spesifik serologik dari *Streptococcus* grup A membentuk suatu lapisan dinding fimbria eksternal yang tebal dan tersebar, yang dapat dirusak oleh tripsin tanpa mengganggu kelangsungan hidup sel.

Bakteri Gram-negatif memperlihatkan tiga lapis pembungkus sel, yaitu : membran luar (OM=outer membran), lapisan tengah yang merupakan dinding sel atau lapisan murein, dan membran plasma dalam.



Gambar 3.11 Diagram skematik dinding sel bakteri gram positif dan gram negatif (Sumber: Todar,K.,2001).

Membran luar mengandung fosfolipid, lipopolisakarida (LPS) atau yang diketahui juga sebagai antigen permukaan O somatik atau endotoxin, dan berbagai protein, dimana protein (porin) dan lipoprotein jumlahnya sangat banyak. Membran luar tersedia sebagai organel aktif secara fisiologik, yang membentuk suatu barrier untuk senyawa hirofilik, berfungsi sebagai molekul penyaring untuk molekul larut-air, terdapat tempat menempel untuk bakteriofaga dan sel inang dan konyugasi bakteri, dalam hal patogenesis dapat mengandung protease dan enzim lain, aggresin, evasin, dan toxin untuk sel inang, menutup dan melindungi dari racun lingkungan dan lisis peptidoglikan dinding sel, komponen gel periplasmik, dan membran plasma, melepaskan vesicular bleb dari LPS dan protein yang tersedia sebagai fungsi sekretori, dan memiliki LPS dan protein yang mengandung molekul sinyal yang dirasakan/diterima oleh sel hewan.

Membran luar mengandung protein unik yang berbeda dari protein membran plasma. Dua lembaran (leaflet) luar dan dalam pada membran luar juga merupakan bentuk asimetrik yang unik. Pada bakteri enterik (contoh, *Salmonella*), fosfatidiletanolamin terdapat seluruhnya pada bagian dalam, sedangkan

lipopolisakarida hidrofilik, anionik terdapat hanya pada bagian luar dari membran luar. Pada spesies *Neisseria* dan *Haemophilus*, fosfolipid terdapat pada bagian luar dan dalam dari membran plasma. Protein yang disebut porin yang terdapat pada membran luar membentuk saluran difusi transmembran. Porin terdapat sebagai saluran untuk senyawa larut-air dengan berat molekul-kecil, atau sebagai reseptor bakteriofaga (virus).

Pada sel bakteri Gram-negatif, titik hubungan di antara membran luar dan dalam disebut sebagai daerah perlekatan atau Bayer junctions. Bayer junction aktif secara fisiologik. Pada bagian luar merupakan tempat masuknya DNA-yang menempel pada bakteriofaga dan lisis yang diperantarai oleh suatu komplemen. Di bagian dalam, daerah perlekatan memperlihatkan suatu zona pertumbuhan (sebagai tempat septa periannular), dan tersedia sebagai tempat untuk translokasi protein sekretori, protein membran luar, lipopolisakarida, dan polisakarida kapsuler dan sebagai daerah munculnya pili seks dan fagel.

Daerah periplasma di antara membran luar dan membran sitoplasma diisi dengan suatu cairan kental (gel), yang dikenal sebagai gel periplasma (termasuk protein dan turunan-membran oligosakarida [Membrane-derived Oligosaccharides] MDOs). Protein gel periplasma merupakan protein terikat-substrat yang menyebabkan konsentrasi substrat dapat melawan gradien dan berbagai enzim hidrolitik. Fluktuasi MDOs kebalikan dari kekuatan ionik medium eksternal, dan dengan cara ini bakteri dapat mengatur osmolaritas sel.

Membran plasma dan membran luar tebalnya sekitar 0,0075 μm . Dengan mikroskop elektron transmisi, kedua membran tersebut dilihat dalam irisan melintang membran, memperlihatkan bentuk struktur “sandwich bileaflet-trilayer” yang berurutan: terdapat dua lapisan hidrofilik masing-masing 2,5 nm (25Å), lapisan tengah merupakan suatu lapisan hidrofobik 2,5 nm yang biasanya disusun oleh rantai alkil asam lemak. Suatu heliks /uliran lipoprotein, satu dari ketiga lapisan yang berikatan secara kovalen pada ujung satu kepada permukaan luar peptidoglikan, menyisipkan ujung lipidnya ke dalam membran luar, menancapkan membran luar kepada sel. Pembungkus sel dapat diisolasi secara bebas dari cairan sitoplasma dengan merusak sel dan sentrifugasi diferensial. Membran dalam dapat dilarutkan dengan sedikit deterjen nonionik, melepaskan ikatan membran luar dari

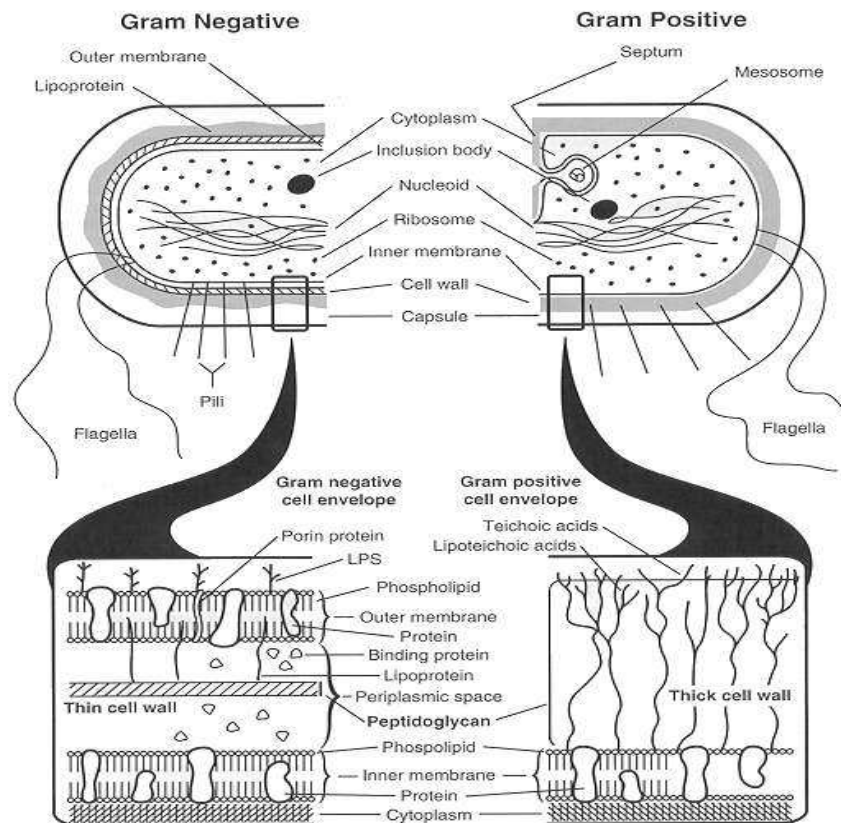
peptidoglikan yang tidak larut. Membran luar dapat dirusak oleh EDTA, detergen ionik kuat, fenol encer, ekstraksi butanol.

Peptidoglikan eubakteri Gram-negatif merupakan struktur tipe A. Diikat molekul lipoprotein secara kovalen, dengan mikroskop elektron terlihat sebagai daerah setiap 10-12 nm pada permukaan luar struktur peptidoglikan. Murein tidak larut ada sekitar 1-2% dari berat kering sel, setelah dihancurkan oleh tripsin untuk membuang sejumlah lipoprotein (lebih dari 4% berat kering sel). Sepertiga dari lipoprotein total terikat secara kovalen pada ujung karboksinya melalui urutan sensitif-tripsin, Lys-Tyr-Arg-Lys, kepada unit asam meso-diaminopimelat (ADP) peptidoglikan. Pada ujung-N, karena berikatan kovalen dengan asam lemak jenuh (contoh, palmitat) dan takjenuh (contoh, palmitoleat dan vaksenat) yang disisipkan ke dalam bilayer lipid membran plasma, lipoprotein bersifat lipofilik kuat dan menancapkan membran plasma bagian luar kepada dinding sel. Lipoprotein juga berhubungan dengan protein OmpA. Lipoprotein tidak mengandung histidin, prolin, fenilalanin, atau triptofan. Lipoprotein merupakan antigen permukaan utama dari dua spiroket, *Borrelia burgdorferi* dan *Treponema pallidum*, juga *Mycoplasma pneumoniae* (tanpa dinding sel).

Endotoksin merupakan istilah yang digunakan sebelum ditemukan identitas endotoksin sebagai komponen lipid A dari LPS. Sekitar 100 tahun endotoksin digambarkan sebagai suatu yang tahan-panas, pyrogenik berhubungan dengan sel (penyebab demam), dan toxin mematikan dari bakteri gram-negatif yang bersifat kebalikan dari exotoksin protein tidak tahan-panas, contohnya toksin tetanus, yang ditemukan di luar sel dalam filtrat kultur. Sekitar 50 tahun yang lalu, LPS diisolasi dan ditemukan mengandung aktivitas endotoksik. Selanjutnya, komponen lipid A dari LPS bakteri gram-negatif endotoksik, memperlihatkan struktur dasar yang identik dan mampu melakukan aktivitas endotoksik.

Lipopolisakarida (LPS) merupakan suatu gugus amfifil (satu ujung hidrofilik, ujung lain hidrofobik), dengan tiga daerah: daerah I (polisakarida O-spesifik), daerah II (core polisakarida), dan daerah III (lipid A). Beberapa bakteri, sebagai contoh, spesies *Neisseria*, dan *Haemophilus*, yang tidak menghasilkan polisakarida daerah I, menghasilkan polimer terpendek yang disebut lipooligosakarida (LOS) yang tercatat sebagai daerah II. Spesifisitas serologik

terutama terletak pada daerah I, juga kadang-kadang daerah II, dan pusat bioaktif, atau endotoxin, pada daerah III. Lipid A, dengan asam lemak pada ujung satu dan grup fosfat pada ujung lainnya, juga merupakan amfifil. Sebagai amfifil, LPS terisolasi dan bentuk lipid A, aktif secara biologi atau misel dengan berat molekul mulai dari 105 – 108.



Gambar 3.12 Diagram perbandingan struktur dinding sel bakteri Gram positif dan Gram negatif secara detail. Gram positif memiliki dinding sel yang tebal, sedangkan Gram negatif dinding selnya tipis (Sumber: Milton R.J. Salton dan Kwang-Shin Kim, 2001)

7. Selubung Bakteri tahan asam (Acid-fast) dan Bakteri yang Berhubungan

Anggota dari genus *Mycobacterium* dan beberapa spesies *Nocardia*, yang berwarna merah dengan pewarna karbolfuksin dan tahan terhadap dekolerasi dengan alkohol-asam, disebut acid-fast (tahan-asam). Komponen terwarnai tersebut berhubungan dengan adanya asam mikolat pada dinding sel bakteri yang utuh. Asam mikolat merupakan pengganti asam lemak (hidroksi yang terdapat pada *Mycobacterium* sebagai ester yang terikat pada polisakarida dinding sel dan sebagai komponen glikolipid yang bebas, kadang-kadang disebut “cord factor”).

Corynebacteria, *Nokardiae*, dan *Mykobakterai* penghasil-asam mikolat diketahui sebagai kelompok bakteri CNM. Kelompok CNM menghasilkan asam mikolat yang bertambah panjang rantainya mulai dari asam corynemikolat (C30), melalui asam nokardat (C50) dan asam mikolat (C90), Hanya *Nokardiae* dan *Mykobacteria* yang menghasilkan asam mikolat terikat-dinding sel.

Dinding sel bakteri *Mycobacterium tuberculosis* mengandung sejumlah peptidoglikan, arabinan, dan lipid yang seimbang. Lebih dari 50% komponen lipid merupakan asam mikolat yang teresterifikasi, sedangkan 25% merupakan asam lemak normal. Asam poli-L-glutamat terikat-peptidoglikan juga terdapat pada *Mycobacterium tuberculosis*. Struktur dasar peptidoglikan *Corynebacterium diphtheriae*, spesies *Nocardia*, dan *M. tuberculosis*. Asam muramat 6-fosfat merupakan ikatan primer di antara arabinogalaktan terikat-dinding sel, arabinomanan, dan peptidoglikan. Asam mikolat terikat-dinding sel diesterifikasi melalui C-5-karboksil dari residu D-arabinosa arabinogalaktan netral. Polimer dinding sel terbesar kedua, arabinomanan, sangat asam, dapat tersuksinilat dan teresterifikasi dengan residu inositol-1-fosfat.

Glikolipid. Beberapa glikolipid yang tidak umum yang tidak terikat dinding sel, terdapat pada bakteri acid-fast dan yang berhubungan. Termasuk didalamnya ialah mikolat trehallosa, sulfolipid,, dan lipooligosakarida, mikosid, dan lipopolisakarida.

Tabel 3.1 Perbandingan Tipe Karakteristik Komponen Pembungkus Bakteri

Bakteri Gram-positif	Bakteri acid-fast	Bakteri Gram-negatif
Peptidoglikan 0,02-0,06 nm (multilayer)	Peptidoglikan 0,01 nm (trilayer)	Peptidoglikan 0,01 nm (bilayer atau trilayer)
Protein	Polipeptida	Lipoprotein
Asam lipoteikoat	As.Mikolat-glikolipid	Membran luar
Asam teikoat	Arabinogalaktan	Lipopolisakarida
	Arabinomannan	
Asam teikuronat	Cord faktor	Protein
Polisakarida	Sulfolipid	Polisakarida
	Mykosid	
	Lipooligosakarida	

8. Protoplas dan Sferoplas

Bakteri biasanya lisis dalam air atau serum, ketika lapisan peptidoglikan dinding sel yang kaku dilarutkan oleh lisozim atau zat lain. Walaupun demikian, jika distabilkan oleh larutan sukrosa atau garam hipertonik (0,2 – 0,5 M, tergantung pada organisme), akan dilepaskan suatu bagian yang berbentuk bola dan sensitif secara osmotik, yang disebut protoplas. Komponen pembungkus yang tetap ada pada bagian yang sensitif tersebut, dinamakan sferoplas. Pada saat komponen membran luar terbentuk, bakteri gram-positif umumnya membentuk protoplas, sedangkan bakteri gram-negatif menghasilkan sferoplas. Sferoplas juga dihasilkan dalam pertumbuhan pada lingkungan hipertonik dengan adanya penghambat sintesis dinding sel, seperti penisilin.

9. Periplasma

Periplasma, merupakan komponen yang terdapat di antara membran dalam dan membran luar dari membran sel bakteri. Periplasma dapat diamati pada bakteri Gram-negatif, tapi pada bakteri Gram-positif tidak semua atau hanya sedikit/sulit diamati. Hal ini dapat dijelaskan dengan tingginya tekanan osmotik dalam sel bakteri Gram-positif (0,05 – 0,2 Pa [5 – 20 atm]) dibandingkan dengan bakteri Gram-negatif (0,03 – 0,05 Pa [3 – 5 atm]). Daerah periplasma bakteri Gram-negatif bervariasi karena kondisi pertumbuhan di antara masing-masing individu bakteri. Gel yang sangat kental dan jumlahnya dapat sangat besar dalam struktur. Gel mengelilingi dan diselingi dengan peptidoglikan berpori. Gel periplasma mengandung oligosakarida yang dihasilkan oleh membran (MDO) yang terdapat dalam ukuran kebalikan dari osmolaritas medium pertumbuhan, berbagai enzim hidrolitik seperti fosfatase, nuklease, (β -laktamase yang dikendalikan plasmid (penisilinase), dan protein yang secara spesifik mengikat gula, bahan-bahan transpor, asam amino, dan ion anorganik. Substansi tersebut dapat dilepaskan dari sel melalui “shock” osmotik, sebagai contoh, dengan pengenceran secara cepat suspensi sel hipertonik (0,5 M sukrosa), sesudah pemberian EDTA.

10. Membran Plasma

Membran plasma merupakan pembungkus sel yang terletak di bagian dalam

dari lapisan dinding sel yang kaku dan berhubungan dekat dengan membran sitoplasma yang lembut, bersifat sangat penting untuk sel. Pada irisan tipis membran plasma di bawah mikroskop elektron memperlihatkan suatu bentuk struktur “sandwich trilaminar” lapisan gelap-terang-gelap.

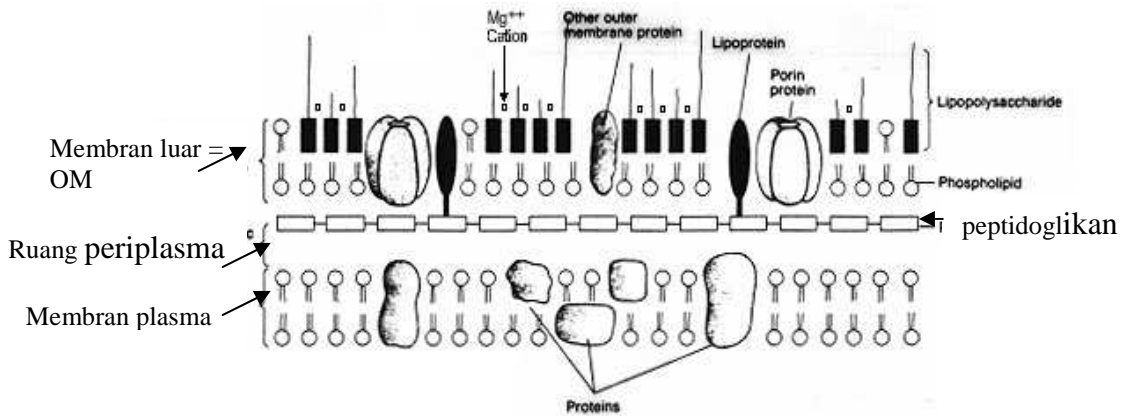
Meskipun bakteri dianggap toleran terhadap perubahan tekanan osmotik yang ekstrim pada lingkungan luar, protoplasnya akan mengalami plasmolisis (menyusut) atau plasmoptisis (membengkak-pecah) ketika ditempatkan dalam media yang tidak sesuai. Penempatan sel dalam larutan hipertonik menyebabkan plasmolisis, terjadi penyusutan/pelepasan membran dan sitoplasma dari dinding sel. Sel Gram-negatif lebih mudah mengalami plasmolisis dibanding sel Gram-positif, yang berhubungan dengan tekanan osmotik dalam selnya.

Barrier osmotik pada bakteri ditunjukkan dengan kemampuannya untuk memadatkan asam amino tertentu melawan gradien. Pada bakteri Gram-positif, suatu gradien 300 – 400 kali lipat dapat melintasi lapisan permukaan. Ester fosfat, asam amino, dan larutan lain menyokong tekanan osmotik dalam sel. Aktivitas osmotik juga ditunjukkan melalui permeabilitas selektif untuk berbagai senyawa.

Komponen membran plasma terdiri dari sekitar 30% atau lebih dari berat sel. Membran mengandung 60-70% protein, 30-40% lipid, dan sejumlah kecil karbohidrat. Fosfatidiletanolamin (75%), fosfatidilgleserol (20%), dan glikolipid sebagai unsur utama. Umumnya tidak terdapat kolin, sfingolipid, asam lemak poliunsaturated (tak-jenuh), inositida, dan steroid. Glikolipid termasuk diglikosildigliserida terutama ditemukan pada membran bakteri gram-positif, yang juga mengandung asam lipoteikoat. Alkohol poliisoprenoid 55-karbon yang diketahui sebagai baktopenol atau undekaprenol terdapat dalam jumlah yang kecil. Aktivitas berbagai enzim dihubungkan dengan protein membran. Termasuk sitokrom bakteri penghasil-energi dan sistem fosforilasi oksidatif, sistem permeabilitas membran, dan berbagai sistem pensintesis-polimer. Suatu ATPase sudah diisolasi dari struktur membran mirip-tombol serupa dengan yang ditemukan dalam mitokondria eukariot. Lebih dari 90% ribosom dapat diisolasi sebagai suatu kumpulan DNA-poliribosom-membran.

Pada bakteri Gram-positif terdapat struktur pelipatan membran plasma ke bagian dalam yang disebut mesosom. Mesosom biasanya terlihat sebagai kantung

sitoplasma penghubung-membran yang terdiri dari lamela (lembaran), tubuler (bentuk tabung) atau struktur vesikuler (kantung); semuanya sering dihubungkan dengan septa pembelahan sel. Penempelan mesosom kepada kromatin DNA dan membran, dapat dilihat pada irisan tipis di bawah mikroskop elektron.



Gambar 3.13 Ilustrasi skematik struktur membran luar, dinding sel dan membran plasma bakteri Gram negatif (Sumber Kenneth,T., 2001)

C. KOMPONEN-KOMPONEN SITOPLASMA

1. Materi Inti (Bahan nuclear)

Materi inti suatu sel bakteri terdiri dari DNA dan RNA. DNA bakteri dapat ditentukan sebagai nukleoid atau badan kromatin dengan mikroskop cahaya dan pewarnaan Feulgen. Teknik pewarnaan langsung terhadap materi inti, badan kromatin sulit dilihat karena RNA berkonsentrasi tinggi, yang dapat dihilangkan dengan pemberian ribonuklease sebelumnya. Badan kromatin dapat dilihat pada semua tahap siklus pertumbuhan.

Materi inti bila dilihat dengan mikroskop elektron menampakkan materi inti sebagai suatu jaring DNA, tidak teratur, seringkali merupakan kumpulan paralel terhadap sumbu sel. Suatu penempelan langsung kepada membran kadang-kadang terlihat nyata. Selama perbanyakan sel, DNA bakteri tetap sebagai jaring kromatin yang tersebar dan tidak pernah berkumpul untuk membentuk suatu kromosom yang tampak jelas selama pembelahan sel, sifat sebaliknya dari kromosom eukariot. Pada saat sel bakteri dihancurkan secara hati-hati, kromosom bakteri dapat dilihat dengan radioautograf sebagai suatu molekul sirkuler. Meskipun DNA bakteri hanya 2-3% berat sel, tapi menempati 10% atau lebih volume sel.

2. Ribosom.

Ribosom merupakan suatu partikel sitoplasma, bila diamati di bawah mikroskop elektron, terlihat suatu partikel sitoplasma kecil. Ribosom terdapat dalam padatan sesudah protoplas setelah sel bakteri dirusak dengan sentrifugasi 100.000 g. Ribosom bakteri berukuran 70S (800 KDa), dan dapat dipisahkan menjadi subunit 30S dan 50S. Subunit 30S mengandung RNA 16S, sedangkan subunit 50S mengandung RNA 23S dan 5S. Kumpulan poliribosom-membran mengandung semua komponen sistem pensintesis-protein; poliribosom merupakan rantai ribosom 70S (monomer) menempel kepada mRNA. Jumlah ribosom bervariasi sesuai dengan kondisi pertumbuhan: sel tumbuh-cepat dalam medium yang sesuai, mengandung lebih banyak ribosom dibandingkan dengan sel tumbuh-lambat dalam medium yang kurang memadai.

Protein mirip-histon saat ini sudah ditemukan dalam jumlah yang kecil berhubungan dengan DNA *E. coli*. Pada bakteri, juga telah diketahui adanya poliamin, seperti putreskin dan spermidin.

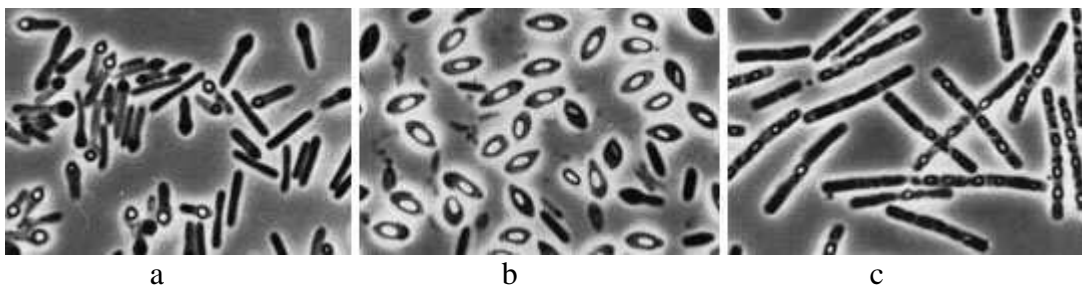
3. Granula Sitoplasma

Granula, diidentifikasi dengan prosedur pewarnaan yang sesuai, menandakan adanya pengumpulan cadangan makanan termasuk polisakarida, lemak, atau polifosfat. Granula bervariasi menurut tipe medium dan tempat fungsional sel. Glikogen merupakan bahan cadangan utama dari bakteri enterik (40% dari berat sel pada beberapa spesies). Dengan cara yang sama, pada beberapa spesies *Bacillus* dan *Pseudomonas* granula ini terdiri dari 30% atau lebih dari berat bakteri, tersimpan sebagai poli-(β -hidroksibutirat. Dengan pewarnaan metakromatik, polifosfat, juga dikenal sebagai Babes-Ernst atau granula volutin, terdapat pada *Corynebacterium diphtheriae*, *Yersinia pestis*, *Mycobacterium tuberculosis*, dan yang lainnya. Pewarnaan granula volutin dalam berbagai warna, nampak berbeda mulai dari merah sampai biru (contoh, secara metakromatik), dengan toluidin dan metilen biru.

D. ENDOSPORA BAKTERI

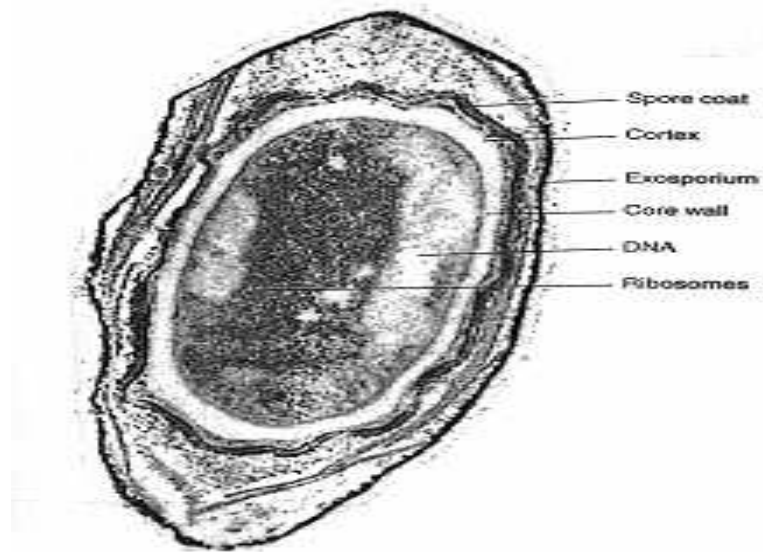
Endospora khususnya dihasilkan oleh bakteri aerobik genus *Bacillus* dan

anaerobik genus *Clostridium*. Endospora tahan terhadap keadaan lingkungan yang merugikan seperti kering, panas, dan kurang tersedia nutrisi. Endospora yang sebenarnya merupakan suatu badan yang sangat membias terbentuk dalam sel bakteri vegetatif. Ukuran, bentuk, dan posisi spora dalam sel induk, sifatnya relatif tetap, menandai suatu spesies. Sampul spora termasuk lapisan peptidoglikan yang kaku, dengan perbedaan komposisi dari sel vegetatif induknya. Antigen permukaan spora biasanya berbeda dari yang dimiliki bentuk batang vegetatif.



Gambar 3.14. Beberapa tipe endospora berdasarkan bentuk dan lokasinya pada sel bakteri (a) tipe endospora di ujung sel (terminal) (b) di tengah sel (sentralis) dan (c) tipe endospora pada bakteri streptobasil (Sumber : Kenneth,T., 2001).

Endospora bakteri terbentuk bukan merupakan strategi reproduktif bagi bakteri, tetapi sebagai bentuk pertahanan sel ketika lingkungan tidak mendukung untuk pertumbuhan sel vegetatifnya. Endospora sangat tahan terhadap fisik dan panas, karena dilindungi oleh beberapa lapisan berupa korteks, eksoporiom dan dinding sel endospora. Endospora dapat bergerminasi atau berkecambah ketika beerada dalam lingkungan yang sesuai untuk pertumbuhannya. Suatu endospora bakteri juga dilengkapi dengan materi inti seperti DNA dan ribosom yang dapat melakukan sintesis protein sendiri ketika berkecambah. Struktur endospora dapat dilihat pada gambar 3.15.



Gambar 3.14. Struktur endospora bakteri dilihat dengan mikroskop elektron
(Sumber Kenneth,T., 2001)

RANGKUMAN

Morfologi sel bakteri memiliki karakteristik yang unik. Berturut-turut meliputi struktur luar dari dinding sel berupa kapsul, membran luar, flagela dan fimbria, serta struktur bagian dalam dinding sel yaitu membran plasma, sitoplasma, bahan inklusio dan materi genetik. Setiap komponen penyusun sel bakteri tersebut memiliki struktur dan fungsi yang khusus untuk mendukung kelangsungan hidup, pertumbuhan, virulensi serta pertahanan bakteri dari tekanan (stress) lingkungan.

Berdasarkan komponen penyusun dinding sel, maka bakteri dapat dikelompokkan menjadi bakteri Gram positif yang memiliki satu lapisan tunggal peptidoglikan dan bakteri Gram negatif yang memiliki tiga lapisan yaitu membran luar, dinding sel dan membran plasma. Peptidoglikan merupakan komponen utama dari bakteri Gram positif, sedangkan lipid merupakan komponen terbesar penyusun bakteri Gram negatif.

Beberapa tipe sel bakteri memiliki kelengkapan tambahan seperti mesosom yang merupakan pelipatan membran plasma ke bagian dalam yang diduga berfungsi sebagai fungsi khusus dan endospora yang memiliki struktur yang tahan terhadap panas sebagai adaptasi sel ketika berada dalam lingkungan yang tidak menguntungkan bagi pertumbuhannya.

PERTANYAAN DAN TUGAS

1. Jelaskan struktur dan fungsi dari:
 - a. fimbria
 - b. flagela
 - c. kapsul
2. Deskripsikan perbedaan struktur bakteri Gram positif dan bakteri Gram negatif, tunjukkan perbedaan yang mendasar antara keduanya !
3. Gambarkan struktur endospora pada sel bakteri. Kapankah endospora terbentuk ?
4. Antibiotik sejenis Penisilin dikenal efektif membunuh bakteri Gram-positif. Namun kebanyakan bakteri Gram negatif lebih resisten dari antibiotik ini dan beberapa bakteri Gram positif yang patogen pada manusia seperti *Staphylococcus aureus* juga resisten terhadap antibiotik ini. Mengapa hal ini bisa terjadi? Jelaskan !
5. Apa perbedaan antara protoplas dan sferoplas ? Bagaimana pengaruh lisozim pada sel eubakteria dan bagaimana mekanismenya ? Dimana kita dapat menemukan Lisozim secara alami ?

ISTILAH PENTING

- flagela
- fimbria
- pili seks
- kapsul
- dinding sel
- murein
- peptidoglikan
- ruang periplasma
- membran plasma
- mesosom
- ribosom
- kromosom
- protoplas
- sferoplas
- Gram negatif
- Gram positif
- endospora