

**TINJAUAN PUSTAKA**  
**SEL STRUKTUR, FUNGSI, DAN REGULASI**



**dr. I Made Subgiartha,SpAn.KAKV.,SH**

**PROGRAM STUDI**  
**ANESTHESIOLOGI DAN TERAPI INTENSIF**  
**FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS UDAYANA**  
**RSUP SANGLAH**  
**2018**

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **SEJARAH**

Sel berasal dari kata latin *cella*, yang berarti ruangan kecil, yang ditemukan oleh Robert Hooke, yang melakukan pengamatan terhadap sayatan gabus (terdapat ruangan-ruangan kecil yang menyusun gabus tersebut).

Dalam biologi, sel merupakan kumpulan materi paling sederhana yang dapat hidup dan merupakan unit penyusun semua makhluk hidup. Sel mampu melakukan semua aktivitas kehidupan dan sebagian besar reaksi kimia untuk mempertahankan kehidupan berlangsung di dalam sel. Kebanyakan makhluk hidup tersusun atas sel tunggal, atau disebut organisme uniseluler, misalnya bakteri dan amuba. Makhluk hidup lainnya, termasuk tumbuhan, hewan, dan manusia, merupakan organisme multiseluler yang terdiri dari banyak tipe sel terspesialisasi dengan fungsinya masing-masing. Tubuh manusia, misalnya, tersusun atas lebih dari  $10^{13}$  sel. Namun demikian, seluruh tubuh semua organisme berasal dari hasil pembelahan satu sel. Contohnya, tubuh bakteri berasal dari pembelahan sel bakteri induknya, sementara tubuh tikus berasal dari pada pembelahan sel telur induknya yang sudah dibuahi.

Sel-sel pada organisme multiseluler tidak akan bertahan lama jika masing-masing berdiri sendiri. Sel yang sama dikelompokkan menjadi jaringan, yang membangun organ dan kemudian sistem organ yang membentuk tubuh organisme tersebut. Contohnya, sel otot jantung membentuk jaringan otot jantung pada organ jantung yang merupakan bagian dari sistem organ peredaran darah pada tubuh manusia. Sementara itu, sel sendiri tersusun atas komponen-komponen yang disebut organel.

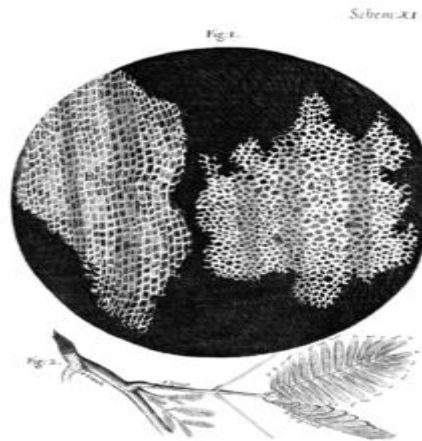
Sel terkecil yang dikenal manusia ialah bakteri *Mycoplasma* dengan diameter 0,0001 sampai 0,001 mm, sedangkan salah satu sel tunggal yang bisa dilihat dengan mata telanjang ialah telur ayam yang belum dibuahi. Akan tetapi, sebagian besar sel berdiameter antara 1 sampai 100  $\mu\text{m}$  (0,001–0,1 mm) sehingga hanya bisa dilihat dengan mikroskop. Penemuan dan kajian awal tentang sel memperoleh kemajuan sejalan dengan penemuan dan penyempurnaan mikroskop pada abad ke-17. Robert Hooke pertama kali mendeskripsikan dan menamai sel pada tahun 1665 ketika ia mengamati suatu irisan gabus (kulit batang pohon ek)

dengan mikroskop yang memiliki perbesaran 30 kali. Namun demikian, teori sel sebagai unit kehidupan baru dirumuskan hampir dua abad setelah itu oleh Matthias Schleiden dan Theodor Schwann. Selanjutnya, sel dikaji dalam cabang biologi yang disebut biologi sel.



Gambar 1: Mikroskop rancangan Robert Hooke menggunakan sumber cahaya lampu minyak.

Mikroskop majemuk dengan dua lensa telah ditemukan pada akhir abad ke-16 dan selanjutnya dikembangkan di Belanda, Italia, dan Inggris. Hingga pertengahan abad ke-17 mikroskop sudah memiliki kemampuan perbesaran citra sampai 30 kali. Ilmuwan Inggris Robert Hooke kemudian merancang mikroskop majemuk yang memiliki sumber cahaya sendiri sehingga lebih mudah digunakan. Ia mengamati irisan-irisan tipis gabus melalui mikroskop dan menjabarkan struktur mikroskopik gabus sebagai "berpori-pori seperti sarang lebah tetapi pori-porinya tidak beraturan" dalam makalah yang diterbitkan pada tahun 1665. Hooke menyebut pori-pori itu *cells* karena mirip dengan sel (bilik kecil) di dalam biara atau penjara. Yang sebenarnya dilihat oleh Hooke adalah dinding sel kosong yang melingkupi sel-sel mati pada gabus yang berasal dari kulit pohon ek. Ia juga mengamati bahwa di dalam tumbuhan hijau terdapat sel yang berisi cairan.



Gambar 2: Gambar struktur gabus yang dilihat Robert Hooke melalui mikroskopnya

Pada masa yang sama di Belanda, Antony van Leeuwenhoek, seorang pedagang kain, menciptakan mikroskopnya sendiri yang berlensa satu dan menggunakannya untuk mengamati berbagai hal. Ia berhasil melihat sel darah merah, spermatozoid, khamir bersel tunggal, protozoa, dan bahkan bakteri. Pada tahun 1673 ia mulai mengirimkan surat yang memerinci kegiatannya kepada Royal Society, perkumpulan ilmiah Inggris, yang lalu menerbitkannya. Pada salah satu suratnya, Leeuwenhoek menggambarkan sesuatu yang bergerak-gerak di dalam air liur yang diamatinya di bawah mikroskop. Ia menyebutnya *dierjen* atau *dierken* (bahasa Belanda: 'hewan kecil', diterjemahkan sebagai *animalcule* dalam bahasa Inggris oleh Royal Society), yang diyakini sebagai bakteri oleh ilmuwan modern.

Pada tahun 1675–1679, ilmuwan Italia Marcello Malpighi menjabarkan unit penyusun tumbuhan yang ia sebut *utricle* ('kantong kecil'). Menurut pengamatannya, setiap rongga tersebut berisi cairan dan dikelilingi oleh dinding yang kokoh. Nehemiah Grew dari Inggris juga menjabarkan sel tumbuhan dalam tulisannya yang diterbitkan pada tahun 1682, dan ia berhasil mengamati banyak struktur hijau kecil di dalam sel-sel daun tumbuhan, yaitu kloroplas.

Orang yang pertama kali menyebutkan istilah sel, yaitu *Cellulae* adalah Robert Hooke (1635-1703). Yang mengamati sayatan gabus tutup botol (*quercus suber*), merupakan sel mati yang tidak memiliki isi sel.

Antonie Van Leeuwenhoek (1723), merupakan seorang asah lensa dari Belanda, membuat mikroskop sederhana dan merupakan orang yang pertama kali melukiskan bentuk-

bentuk bakteri. Beliau memeriksa setetes cairan air kolam dengan microscopic, di dapatkan “*animalcules*” (hewan kecil), merupakan sel bakteri.

Beberapa ilmuwan pada abad ke-18 dan awal abad ke-19 telah berspekulasi atau mengamati bahwa tumbuhan dan hewan tersusun atas sel, namun hal tersebut masih diperdebatkan pada saat itu. Pada tahun 1838, ahli botani Jerman Matthias Jakob Schleiden menyatakan bahwa semua tumbuhan terdiri atas sel dan bahwa semua aspek fungsi tubuh tumbuhan pada dasarnya merupakan manifestasi aktivitas sel. Ia juga menyatakan pentingnya nukleus (yang ditemukan Robert Brown pada tahun 1831) dalam fungsi dan pembentukan sel, namun ia salah mengira bahwa sel terbentuk dari nukleus.

Pada tahun 1839, Theodor Schwann, yang setelah berdiskusi dengan Schleiden menyadari bahwa ia pernah mengamati nukleus sel hewan sebagaimana Schleiden mengamatinya pada tumbuhan, menyatakan bahwa semua bagian tubuh hewan juga tersusun atas sel. Menurutnya, prinsip universal pembentukan berbagai bagian tubuh semua organisme adalah pembentukan sel. Yang kemudian memerinci teori sel sebagaimana yang dikenal dalam bentuk modern ialah Rudolf Virchow, seorang ilmuwan Jerman lainnya. Pada mulanya ia sependapat dengan Schleiden mengenai pembentukan sel. Namun, pengamatan mikroskopis atas berbagai proses patologis membuatnya menyimpulkan hal yang sama dengan yang telah disimpulkan oleh Robert Remak dari pengamatannya terhadap sel darah merah dan embrio, yaitu bahwa sel berasal dari sel lain melalui pembelahan sel. Pada tahun 1855, Virchow menerbitkan makalahnya yang memuat motonya yang terkenal, *omnis cellula e cellula* (semua sel berasal dari sel).

Teori Sel adalah:

1. Semua organisme hidup terdiri dari sel beserta produk-produknya.
2. Semua sel pada dasarnya serupa dalam susunan kimianya.
3. Sel-sel baru terbentuk dari sel-sel yang sudah ada melalui pembelahan sel.
4. Aktivitas sebuah organism merupakan hasil aktivitas dan interaksi sel-selnya.

**BAB II**  
**PEMBAHASAN**  
**SEL STRUKTUR, FUNGSI, DAN REGULASI**

Sel merupakan unit structural terkecil dari organisme hidup. Sel di kelilingi oleh selaput/membrane sel yang di dalamnya terdapat cairan (protoplasma) atau matriks, dan bentuk-bentuk subselular, organel sel, yang juga dikelilingi membran. Protoplasma terdiri dari plasma sel (sitoplasma) dan inti sel (nucleus), Di dalam inti sel terdapat plasma inti atau nukleoplasma.

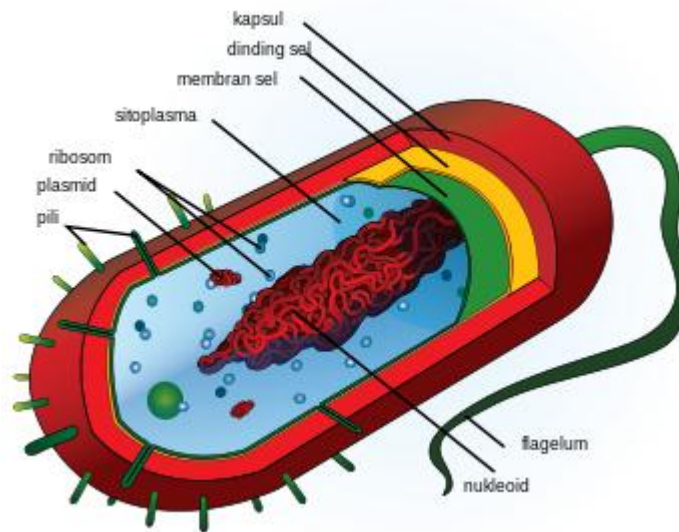
Secara struktural, sel merupakan satuan terkecil makhluk hidup yang dapat melaksanakan kehidupan, yang merupakan unit terkecil penyusun makhluk hidup. Secara fungsional, sel berfungsi untuk menjalankan fungsi kehidupan (menyelenggarakan kehidupan jika sel-sel penyusunya berfungsi), kemudian membentuk organisme.

Sel berkembang biak dengan cara membelah diri (secara mitosis). Selain itu sel juga mengandung materi genetik, yaitu materi penentu sifat-sifat makhluk hidup, maka sifat makhluk hidup dapat diwariskan kepada keturunannya. Setiap sel, pada tahap tertentu dalam hidupnya, mengandung DNA sebagai materi yang dapat diwariskan dan mengarahkan aktivitas sel tersebut. Selain itu, semua sel memiliki struktur yang disebut ribosom yang berfungsi dalam pembuatan protein yang akan digunakan sebagai katalis pada berbagai reaksi kimia dalam sel tersebut.

**STRUKTUR SEL**

Setiap organisme tersusun atas salah satu dari dua jenis sel yang secara struktur berbeda: sel prokariotik atau sel eukariotik. Kedua jenis sel ini dibedakan berdasarkan posisi DNA di dalam sel; sebagian besar DNA pada eukariota terselubung membran organel yang disebut nukleus atau inti sel, sedangkan prokariota tidak memiliki nukleus.

## SEL PROKARIOTIK



Gambar 3: Gambaran umum sel prokariota.

Pada sel prokariota (dari bahasa Yunani, *pro*, 'sebelum' dan *karyon*, 'biji'), tidak ada membran yang memisahkan DNA dari bagian sel lainnya, dan daerah tempat DNA terkonsentrasi di sitoplasma disebut *nukleoid*. Kebanyakan prokariota merupakan organisme uniseluler dengan sel berukuran kecil (berdiameter 0,7–2,0  $\mu\text{m}$  dan volumenya sekitar 1  $\mu\text{m}^3$ ) serta umumnya terdiri dari selubung sel, membran sel, sitoplasma, nukleoid, dan beberapa struktur lain.

Hampir semua sel prokariotik memiliki selubung sel di luar membran selnya. Jika selubung tersebut mengandung suatu lapisan kaku yang terbuat dari karbohidrat atau kompleks karbohidrat-protein, peptidoglikan, lapisan itu disebut sebagai dinding sel. Kebanyakan bakteri memiliki suatu membran luar yang menutupi lapisan peptidoglikan, dan ada pula bakteri yang memiliki selubung sel dari protein. Sementara itu, kebanyakan selubung sel arkea berbahan protein, walaupun ada juga yang berbahan peptidoglikan. Selubung sel prokariota mencegah sel pecah akibat tekanan osmotik pada lingkungan yang memiliki konsentrasi lebih rendah daripada isi sel.

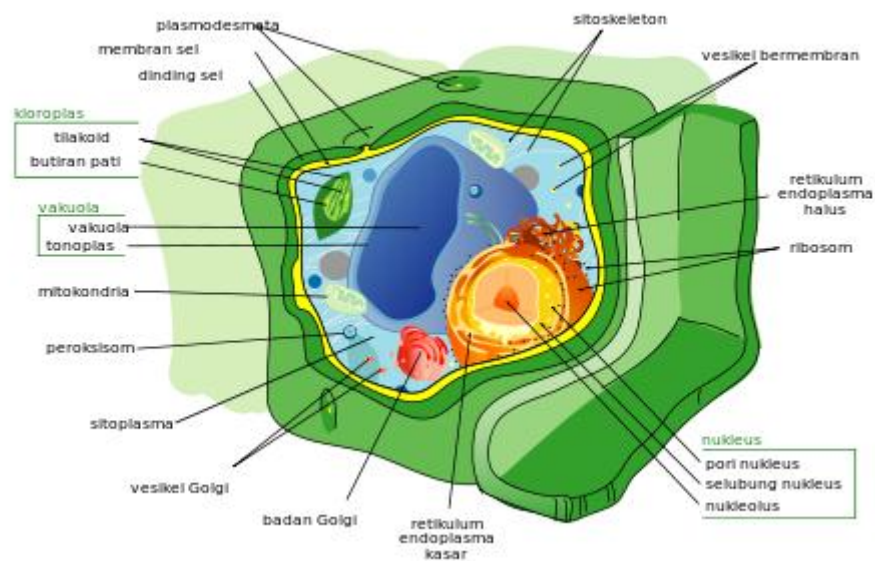
Sejumlah prokariota memiliki struktur lain di luar selubung selnya. Banyak jenis bakteri memiliki lapisan di luar dinding sel yang disebut *kapsul* yang membantu sel bakteri melekat pada permukaan benda dan sel lain. Kapsul juga dapat membantu sel bakteri

menghindar dari sel kekebalan tubuh manusia jenis tertentu. Selain itu, sejumlah bakteri melekat pada permukaan benda dan sel lain dengan benang protein yang disebut *pilus* (jamak: pili) dan *fimbria* (jamak: fimbriae). Banyak jenis bakteri bergerak menggunakan *flagelum* (jamak: flagela) yang melekat pada dinding selnya dan berputar seperti motor.

Prokariota umumnya memiliki satu molekul DNA dengan struktur lingkaran yang terkonsentrasi pada nukleoid. Selain itu, prokariota sering kali juga memiliki bahan genetik tambahan yang disebut plasmid yang juga berstruktur DNA lingkaran. Pada umumnya, plasmid tidak dibutuhkan oleh sel untuk pertumbuhan meskipun sering kali plasmid membawa gen tertentu yang memberikan keuntungan tambahan pada keadaan tertentu, misalnya resistansi terhadap antibiotik.

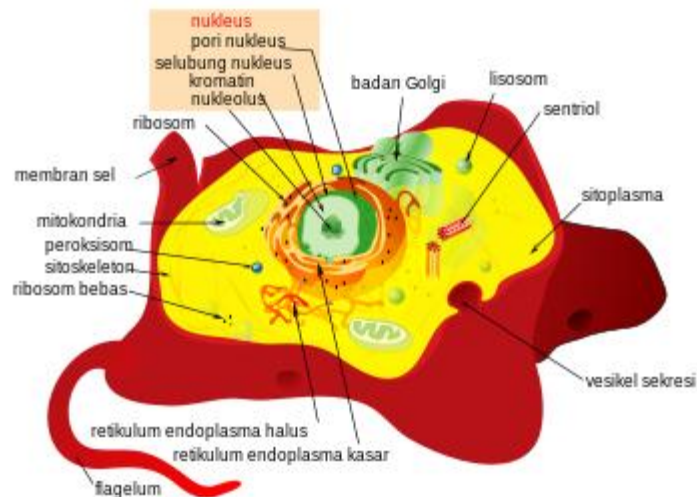
Prokariota juga memiliki sejumlah protein struktural yang disebut sitoskeleton, yang pada mulanya dianggap hanya ada pada eukariota. Protein skeleton tersebut meregulasi pembelahan sel dan berperan menentukan bentuk sel.

## **SEL EUKARIOTIK**



Gambar 4: Gambaran umum sel tumbuhan.





Gambar 5: Gambaran umum sel hewan.

Tidak seperti prokariota, sel eukariota (bahasa Yunani, *eu*, 'sebenarnya' dan *karyon*) memiliki nukleus. Diameter sel eukariota biasanya 10 hingga 100  $\mu\text{m}$ , sepuluh kali lebih besar daripada bakteri. Sitoplasma eukariota adalah daerah di antara nukleus dan membran sel. Sitoplasma ini terdiri dari medium semicair yang disebut sitosol, yang di dalamnya terdapat organel-organel dengan bentuk dan fungsi terspesialisasi serta sebagian besar tidak dimiliki prokariota. Kebanyakan organel dibatasi oleh satu lapis membran, namun ada pula yang dibatasi oleh dua membran, misalnya nukleus.

Selain nukleus, sejumlah organel lain dimiliki hampir semua sel eukariota, yaitu (1) mitokondria, tempat sebagian besar metabolisme energi sel terjadi; (2) retikulum endoplasma, suatu jaringan membran tempat sintesis glikoprotein dan lipid; (3) badan golgi, yang mengarahkan hasil sintesis sel ke tempat tujuannya; serta (4) peroksisom, tempat perombakan asam lemak dan asam amino. Lisosom, yang menguraikan komponen sel yang rusak dan benda asing yang dimasukkan oleh sel, ditemukan pada sel hewan, tetapi tidak pada sel tumbuhan. Kloroplas, tempat terjadinya fotosintesis, hanya ditemukan pada sel-sel tertentu daun tumbuhan dan sejumlah organisme uniseluler. Baik sel tumbuhan maupun sejumlah eukariota uniseluler memiliki satu atau lebih vakuola, yaitu organel tempat menyimpan nutrisi dan limbah serta tempat terjadinya sejumlah reaksi penguraian.

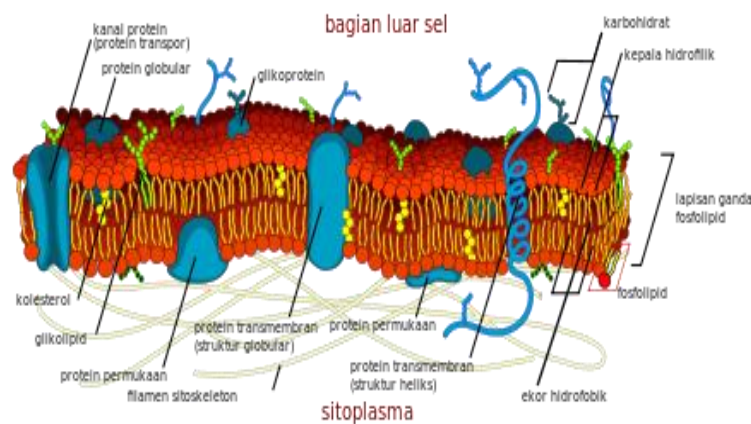
Jaringan protein serat sitoskeleton mempertahankan bentuk sel dan mengendalikan pergerakan struktur di dalam sel eukariota. Sentriol, yang hanya ditemukan pada sel hewan di dekat nukleus, juga terbuat dari sitoskeleton.

Dinding sel yang kaku, terbuat dari selulosa dan polimer lain, mengelilingi sel tumbuhan dan membuatnya kuat dan tegar. Fungi juga memiliki dinding sel, namun komposisinya berbeda dari dinding sel bakteri maupun tumbuhan. Di antara dinding sel tumbuhan yang bersebelahan terdapat saluran yang disebut plasmodesmata.

## Struktur Sel Eukariotik

### Komponen subseluler

#### a. Membran



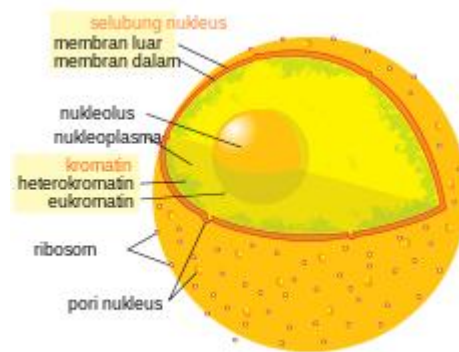
Gambar 6: Membran sel terdiri dari lapisan ganda fosfolipid dan berbagai protein.

Membran sel yang membatasi sel disebut sebagai membran plasma dan berfungsi sebagai rintangan selektif yang memungkinkan aliran oksigen, nutrisi, dan limbah yang cukup untuk melayani seluruh volume sel. Membran sel juga berperan dalam sintesis ATP, pensinyalan sel, dan adhesi sel.

Membran sel berupa lapisan sangat tipis yang terbentuk dari molekul lipid dan protein. Membran sel bersifat dinamik dan kebanyakan molekulnya dapat bergerak di sepanjang bidang membran. Molekul lipid membran tersusun dalam dua lapis dengan tebal sekitar 5 nm yang menjadi penghalang bagi kebanyakan molekul hidrofilik. Molekul-molekul protein yang menembus lapisan ganda lipid tersebut berperan dalam hampir semua fungsi lain membran,

misalnya mengangkut molekul tertentu melewati membran. Ada pula protein yang menjadi pengait struktural ke sel lain, atau menjadi reseptor yang mendeteksi dan menyalurkan sinyal kimiawi dalam lingkungan sel. Diperkirakan bahwa sekitar 30% protein yang dapat disintesis sel hewan merupakan protein membran.

## b. Nukleus



Gambar 7: Nukleus dan bagian-bagiannya.

Nukleus mengandung sebagian besar gen yang mengendalikan sel eukariota (sebagian lain gen terletak di dalam mitokondria dan kloroplas). Dengan diameter rata-rata 5  $\mu\text{m}$ , organel ini umumnya adalah organel yang paling mencolok dalam sel eukariota. Kebanyakan sel memiliki satu nukleus, namun ada pula yang memiliki banyak nukleus, contohnya sel otot rangka, dan ada pula yang tidak memiliki nukleus, contohnya sel darah merah matang yang kehilangan nukleusnya saat berkembang.

Selubung nukleus melingkupi nukleus dan memisahkan isinya (yang disebut *nukleoplasma*) dari sitoplasma. Selubung ini terdiri dari dua membran yang masing-masing merupakan lapisan ganda lipid dengan protein terkait. Membran luar dan dalam selubung nukleus dipisahkan oleh ruangan sekitar 20–40 nm. Selubung nukleus memiliki sejumlah pori yang berdiameter sekitar 100 nm dan pada bibir setiap pori, kedua membran selubung nukleus menyatu.

Di dalam nukleus, DNA terorganisasi bersama dengan protein menjadi kromatin. Sewaktu sel siap untuk membelah, kromatin kusut yang berbentuk benang akan menggulung,

menjadi cukup tebal untuk dibedakan melalui mikroskop sebagai struktur terpisah yang disebut kromosom.

Struktur yang menonjol di dalam nukleus sel yang sedang tidak membelah ialah nukleolus, yang merupakan tempat sejumlah komponen ribosom disintesis dan dirakit. Komponen-komponen ini kemudian dilewatkan melalui pori nukleus ke sitoplasma, tempat semuanya bergabung menjadi ribosom. Kadang-kadang terdapat lebih dari satu nukleolus, bergantung pada spesiesnya dan tahap reproduksi sel tersebut.

Nukleus mengedalikan sintesis protein di dalam sitoplasma dengan cara mengirim molekul pembawa pesan berupa RNA, yaitu mRNA, yang disintesis berdasarkan "pesan" gen pada DNA. RNA ini lalu dikeluarkan ke sitoplasma melalui pori nukleus dan melekat pada ribosom, tempat pesan genetik tersebut diterjemahkan menjadi urutan asam amino protein yang disintesis.

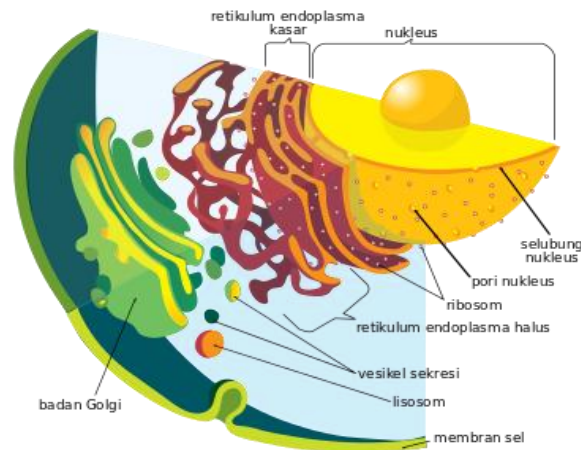
#### c. Ribosom

Ribosom merupakan tempat sel membuat protein. Sel dengan laju sintesis protein yang tinggi memiliki banyak sekali ribosom, contohnya sel hati manusia yang memiliki beberapa juta ribosom. Ribosom sendiri tersusun atas berbagai jenis protein dan sejumlah molekul RNA.

Ribosom eukariota lebih besar daripada ribosom prokariota, namun keduanya sangat mirip dalam hal struktur dan fungsi. Keduanya terdiri dari satu subunit besar dan satu subunit kecil yang bergabung membentuk ribosom lengkap dengan massa beberapa juta dalton.

Pada eukariota, ribosom dapat ditemukan bebas di sitosol atau terikat pada bagian luar retikulum endoplasma. Sebagian besar protein yang diproduksi ribosom bebas akan berfungsi di dalam sitosol, sementara ribosom terikat umumnya membuat protein yang ditujukan untuk dimasukkan ke dalam membran, untuk dibungkus di dalam organel tertentu seperti lisosom, atau untuk dikirim ke luar sel. Ribosom bebas dan terikat memiliki struktur identik dan dapat saling bertukar tempat. Sel dapat menyesuaikan jumlah relatif masing-masing ribosom begitu metabolismenya berubah.

#### d. Sistem endomembran



Gambar 8: Sistem endomembran sel.

Berbagai membran dalam sel eukariota merupakan bagian dari sistem endomembran. Membran ini dihubungkan melalui sambungan fisik langsung atau melalui transfer antarsegmen membran dalam bentuk vesikel (gelembung yang dibungkus membran) kecil. Sistem endomembran mencakup selubung nukleus, retikulum endoplasma, badan Golgi, lisosom, berbagai jenis vakuola, dan membran plasma. Sistem ini memiliki berbagai fungsi, termasuk sintesis dan modifikasi protein serta transpor protein ke membran dan organel atau ke luar sel, sintesis lipid, dan penetralan beberapa jenis racun.

#### e. Retikulum endoplasma

Retikulum endoplasma merupakan perluasan selubung nukleus yang terdiri dari jaringan (*reticulum* = 'jaring kecil') saluran bermembran dan vesikel yang saling terhubung. Terdapat dua bentuk retikulum endoplasma, yaitu retikulum endoplasma kasar dan retikulum endoplasma halus. Retikulum endoplasma kasar disebut demikian karena permukaannya ditempeli banyak ribosom. Ribosom yang mulai mensintesis protein dengan tempat tujuan tertentu, seperti organel tertentu atau membran, akan menempel pada retikulum endoplasma kasar. Protein yang terbentuk akan terdorong ke bagian dalam retikulum endoplasma yang disebut *lumen*. Di dalam lumen, protein tersebut mengalami pelipatan dan dimodifikasi, misalnya dengan penambahan karbohidrat untuk membentuk glikoprotein. Protein tersebut lalu dipindahkan ke bagian lain sel di dalam vesikel kecil yang menyembul keluar dari

retikulum endoplasma, dan bergabung dengan organel yang berperan lebih lanjut dalam modifikasi dan distribusinya. Kebanyakan protein menuju ke badan Golgi, yang akan mengemas dan memilahnya untuk diantarkan ke tujuan akhirnya.

Retikulum endoplasma halus tidak memiliki ribosom pada permukaannya. Retikulum endoplasma halus berfungsi, misalnya, dalam sintesis lipid komponen membran sel. Dalam jenis sel tertentu, misalnya sel hati, membran retikulum endoplasma halus mengandung enzim yang mengubah obat-obatan, racun, dan produk sampingan beracun dari metabolisme sel menjadi senyawa-senyawa yang kurang beracun atau lebih mudah dikeluarkan tubuh.

#### f. Badan Golgi

Badan Golgi (dinamai menurut nama penemunya, Camillo Golgi) tersusun atas setumpuk kantong pipih dari membran yang disebut *sisterna*. Biasanya terdapat tiga sampai delapan sisterna, tetapi ada sejumlah organisme yang memiliki badan Golgi dengan puluhan sisterna. Jumlah dan ukuran badan Golgi bergantung pada jenis sel dan aktivitas metabolismenya. Sel yang aktif melakukan sekresi protein dapat memiliki ratusan badan Golgi. Organel ini biasanya terletak di antara retikulum endoplasma dan membran plasma.

Sisi badan Golgi yang paling dekat dengan nukleus disebut sisi *cis*, sementara sisi yang menjauhi nukleus disebut sisi *trans*. Ketika tiba di sisi *cis*, protein dimasukkan ke dalam lumen sisterna. Di dalam lumen, protein tersebut dimodifikasi, misalnya dengan penambahan karbohidrat, ditandai dengan penanda kimiawi, dan dipilah-pilah agar nantinya dapat dikirim ke tujuannya masing-masing.

Badan Golgi mengatur pergerakan berbagai jenis protein; ada yang disekresikan ke luar sel, ada yang digabungkan ke membran plasma sebagai protein transmembran, dan ada pula yang ditempatkan di dalam lisosom. Protein yang disekresikan dari sel diangkut ke membran plasma di dalam vesikel sekresi, yang melepaskan isinya dengan cara bergabung dengan membran plasma dalam proses eksositosis. Proses sebaliknya, endositosis, dapat terjadi bila membran plasma mencekung ke dalam sel dan membentuk vesikel endositosis yang dibawa ke badan Golgi atau tempat lain, misalnya lisosom.

#### g. Lisosom

Lisosom pada sel hewan merupakan vesikel yang memuat lebih dari 30 jenis enzim hidrolitik untuk menguraikan berbagai molekul kompleks. Sel menggunakan kembali subunit molekul yang sudah diuraikan lisosom itu. Bergantung pada zat yang diuraikannya, lisosom dapat memiliki berbagai ukuran dan bentuk. Organel ini dibentuk sebagai vesikel yang melepaskan diri dari badan Golgi.

Lisosom menguraikan molekul makanan yang masuk ke dalam sel melalui endositosis ketika suatu vesikel endositosis bergabung dengan lisosom. Dalam proses yang disebut autofagi, lisosom mencerna organel yang tidak berfungsi dengan benar. Lisosom juga berperan dalam fagositosis, proses yang dilakukan sejumlah jenis sel untuk menelan bakteri atau fragmen sel lain untuk diuraikan. Contoh sel yang melakukan fagositosis ialah sejenis sel darah putih yang disebut fagosit, yang berperan penting dalam sistem kekebalan tubuh.

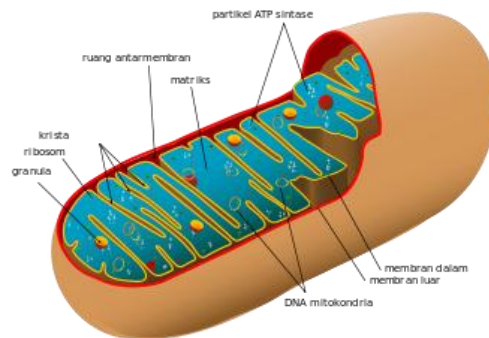
#### h. Vakuola

Kebanyakan fungsi lisosom sel hewan dilakukan oleh vakuola pada sel tumbuhan. Membran vakuola, yang merupakan bagian dari sistem endomembran, disebut *tonoplas*. Vakuola berasal dari kata bahasa Latin *vacuolum* yang berarti 'kosong' dan dinamai demikian karena organel ini tidak memiliki struktur internal. Umumnya vakuola lebih besar daripada vesikel, dan kadang kala terbentuk dari gabungan banyak vesikel.

Sel tumbuhan muda berukuran kecil dan mengandung banyak vakuola kecil yang kemudian bergabung membentuk suatu vakuola sentral seiring dengan penambahan air ke dalamnya. Ukuran sel tumbuhan diperbesar dengan menambahkan air ke dalam vakuola sentral tersebut. Vakuola sentral juga mengandung cadangan makanan, garam-garam, pigmen, dan limbah metabolisme. Zat yang beracun bagi herbivora dapat pula disimpan dalam vakuola sebagai mekanisme pertahanan. Vakuola juga berperan penting dalam mempertahankan tekanan turgor tumbuhan.

Vakuola memiliki banyak fungsi lain dan juga dapat ditemukan pada sel hewan dan protista uniseluler. Kebanyakan protozoa memiliki vakuola makanan, yang bergabung dengan lisosom agar makanan di dalamnya dapat dicerna. Beberapa jenis protozoa juga memiliki vakuola kontraktil, yang mengeluarkan kelebihan air dari sel.

## i. Mitokondria



Gambar 9: Gambaran umum mitokondria.

Sebagian besar sel eukariota mengandung banyak mitokondria, yang menempati sampai 25 persen volume sitoplasma. Organel ini termasuk organel yang besar, secara umum hanya lebih kecil dari nukleus, vakuola, dan kloroplas. Nama mitokondria berasal dari penampakkannya yang seperti benang (bahasa Yunani *mitos*, 'benang') di bawah mikroskop cahaya.

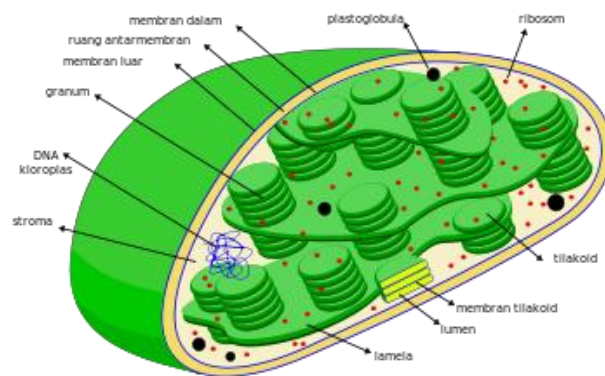
Organel ini memiliki dua macam membran, yaitu membran luar dan membran dalam, yang dipisahkan oleh ruang antarmembran. Luas permukaan membran dalam lebih besar daripada membran luar karena memiliki lipatan-lipatan, atau *krista*, yang menyembul ke dalam *matriks*, atau ruang dalam mitokondria.

Mitokondria adalah tempat berlangsungnya respirasi seluler, yaitu suatu proses kimiawi yang memberi energi pada sel. Karbohidrat dan lemak merupakan contoh molekul makanan berenergi tinggi yang dipecah menjadi air dan karbon dioksida oleh reaksi-reaksi di dalam mitokondria, dengan pelepasan energi. Kebanyakan energi yang dilepas dalam proses itu ditangkap oleh molekul yang disebut ATP. Mitokondria-lah yang menghasilkan sebagian besar ATP sel. Energi kimiawi ATP nantinya dapat digunakan untuk menjalankan berbagai reaksi kimia dalam sel. Sebagian besar tahap pemecahan molekul makanan dan pembuatan ATP tersebut dilakukan oleh enzim-enzim yang terdapat di dalam krista dan matriks mitokondria.



Mitokondria memperbanyak diri secara independen dari keseluruhan bagian sel lain. Organel ini memiliki DNA sendiri yang menyandikan sejumlah protein mitokondria, yang dibuat pada ribosomnya sendiri yang serupa dengan ribosom prokariota.

#### j. Kloroplas



Gambar 10: Gambaran umum kloroplas.

Kloroplas merupakan salah satu jenis organel yang disebut plastid pada tumbuhan dan alga. Kloroplas mengandung klorofil, pigmen hijau yang menangkap energi cahaya untuk fotosintesis, yaitu serangkaian reaksi yang mengubah energi cahaya menjadi energi kimiawi yang disimpan dalam molekul karbohidrat dan senyawa organik lain.

Satu sel alga uniseluler dapat memiliki satu kloroplas saja, sementara satu sel daun dapat memiliki 20 sampai 100 kloroplas. Organel ini cenderung lebih besar daripada mitokondria, dengan panjang 5–10  $\mu\text{m}$  atau lebih. Kloroplas biasanya berbentuk seperti cakram dan, seperti mitokondria, memiliki membran luar dan membran dalam yang dipisahkan oleh ruang antarmembran. Membran dalam kloroplas menyelimuti *stroma*, yang memuat berbagai enzim yang bertanggung jawab membentuk karbohidrat dari karbon dioksida dan air dalam fotosintesis. Suatu sistem membran dalam yang kedua di dalam stroma terdiri dari kantong-kantong pipih disebut *tilakoid* yang saling berhubungan. Tilakoid-tilakoid membentuk suatu tumpukan yang disebut *granum* (jamak, *grana*). Klorofil terdapat pada membran tilakoid, yang berperan serupa dengan membran dalam mitokondria, yaitu terlibat dalam pembentukan ATP. Sebagian ATP yang terbentuk ini digunakan oleh enzim di stroma

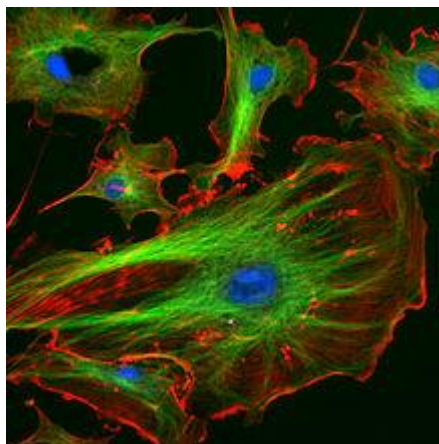
untuk mengubah karbon dioksida menjadi senyawa antara berkarbon tiga yang kemudian dikeluarkan ke sitoplasma dan diubah menjadi karbohidrat.

Sama seperti mitokondria, kloroplas juga memiliki DNA dan ribosomnya sendiri serta tumbuh dan memperbanyak dirinya sendiri. Kedua organel ini juga dapat berpindah-pindah tempat di dalam sel.

#### k. Peroksisom

Peroksisom berukuran mirip dengan lisosom dan dapat ditemukan dalam semua sel eukariota. Organel ini dinamai demikian karena biasanya mengandung satu atau lebih enzim yang terlibat dalam reaksi oksidasi menghasilkan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ). Hidrogen peroksida merupakan bahan kimia beracun, namun di dalam peroksisom senyawa ini digunakan untuk reaksi oksidasi lain atau diuraikan menjadi air dan oksigen. Salah satu tugas peroksisom adalah mengoksidasi asam lemak panjang menjadi lebih pendek yang kemudian dibawa ke mitokondria untuk oksidasi sempurna. Peroksisom pada sel hati dan ginjal juga mendetoksifikasi berbagai molekul beracun yang memasuki darah, misalnya alkohol. Sementara itu, peroksisom pada biji tumbuhan berperan penting mengubah cadangan lemak biji menjadi karbohidrat yang digunakan dalam tahap perkecambahan.

#### l. Sitoskeleton



Gambar 11: Sitoskeleton sel eukariota; mikrotubulus diwarnai hijau, sementara mikrofilamen diwarnai merah.

Sitoskeleton eukariota terdiri dari tiga jenis serat protein, yaitu mikrotubulus, filamen intermediat, dan mikrofilamen. Protein sitoskeleton yang serupa dan berfungsi sama dengan sitoskeleton eukariota ditemukan pula pada prokariota. Mikrotubulus berupa silinder berongga yang memberi bentuk sel, menuntun gerakan organel, dan membantu pergerakan kromosom pada saat pembelahan sel. Silia dan flagela eukariota, yang merupakan alat bantu pergerakan, juga berisi mikrotubulus. Filamen intermediat mendukung bentuk sel dan membuat organel tetap berada di tempatnya. Sementara itu, mikrofilamen, yang berupa batang tipis dari protein aktin, berfungsi antara lain dalam kontraksi otot pada hewan, pembentukan pseudopodia untuk pergerakan sel ameba, dan aliran bahan di dalam sitoplasma sel tumbuhan.

Sejumlah *protein motor* menggerakkan berbagai organel di sepanjang sitoskeleton eukariota. Secara umum, protein motor dapat digolongkan dalam tiga jenis, yaitu kinesin, dinein, dan miosin. Kinesin dan dinein bergerak pada mikrotubulus, sementara miosin bergerak pada mikrofilamen.

#### m. Komponen ekstraseluler

Sel-sel hewan dan tumbuhan disatukan sebagai jaringan terutama oleh *matriks ekstraseluler*, yaitu jejaring kompleks molekul yang disekresikan sel dan berfungsi utama membentuk kerangka pendukung. Terutama pada hewan, sel-sel pada kebanyakan jaringan terikat langsung satu sama lain melalui *sambungan sel*.

#### Matriks ekstraseluler hewan

Matriks ekstraseluler sel hewan berbahan penyusun utama glikoprotein (protein yang berikatan dengan karbohidrat pendek), dan yang paling melimpah ialah kolagen yang membentuk serat kuat di bagian luar sel. Serat kolagen ini tertanam dalam jalinan tenunan yang terbuat dari proteoglikan, yang merupakan glikoprotein kelas lain. Variasi jenis dan susunan molekul matriks ekstraseluler menimbulkan berbagai bentuk, misalnya keras seperti permukaan tulang dan gigi, transparan seperti kornea mata, atau berbentuk seperti tali kuat pada otot. Matriks ekstraseluler tidak hanya menyatukan sel-sel tetapi juga memengaruhi perkembangan, bentuk, dan perilaku sel.

### Dinding sel tumbuhan

Dinding sel tumbuhan merupakan matriks ekstraseluler yang menyelubungi tiap sel tumbuhan. Dinding ini tersusun atas serabut selulosa yang tertanam dalam polisakarida lain serta protein dan berukuran jauh lebih tebal daripada membran plasma, yaitu 0,1  $\mu\text{m}$  hingga beberapa mikrometer. Dinding sel melindungi sel tumbuhan, mempertahankan bentuknya, dan mencegah pengisapan air secara berlebihan.

### Sambungan antarsel

Sambungan sel (*cell junction*) dapat ditemukan pada titik-titik pertemuan antarsel atau antara sel dan matriks ekstraseluler. Menurut fungsinya, sambungan sel dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu (1) sambungan penyumbat (*occluding junction*), (2) sambungan jangkar (*anchoring junction*), dan (3) sambungan pengomunikasi (*communicating junction*). Sambungan penyumbat menyegel permukaan dua sel menjadi satu sedemikian rupa sehingga molekul kecil sekalipun tidak dapat lewat, contohnya ialah sambungan ketat (*tight junction*) pada vertebrata. Sementara itu, sambungan jangkar menempelkan sel (dan sitoskeletonnya) ke sel tetangganya atau ke matriks ekstraseluler. Terakhir, sambungan pengomunikasi menyatukan dua sel tetapi memungkinkan sinyal kimiawi atau listrik melintas antarsel tersebut. Plasmodesmata merupakan contoh sambungan pengomunikasi yang hanya ditemukan pada tumbuhan.

## **FUNGSI SEL**

### 1. Metabolisme

Keseluruhan reaksi kimia yang membuat makhluk hidup mampu melakukan aktivitasnya disebut metabolisme, dan sebagian besar reaksi kimia tersebut terjadi di dalam sel. Metabolisme yang terjadi di dalam sel dapat berupa reaksi katabolik, yaitu perombakan senyawa kimia untuk menghasilkan energi maupun untuk dijadikan bahan pembentukan senyawa lain, dan reaksi anabolik, yaitu reaksi penyusunan komponen sel. Salah satu proses katabolik yang merombak molekul makanan untuk menghasilkan energi di dalam sel ialah respirasi seluler, yang sebagian besar berlangsung di dalam mitokondria eukariota atau sitosol

prokariota dan menghasilkan ATP. Sementara itu, contoh proses anabolik ialah sintesis protein yang berlangsung pada ribosom dan membutuhkan ATP.

## 2. Komunikasi sel

Kemampuan sel untuk berkomunikasi, yaitu menerima dan mengirimkan 'sinyal' dari dan kepada sel lain, menentukan interaksi antarorganisme uniseluler serta mengatur fungsi dan perkembangan tubuh organisme multiseluler. Misalnya, bakteri berkomunikasi satu sama lain dalam proses *quorum sensing* (pengindraan kuorum) untuk menentukan apakah jumlah mereka sudah cukup sebelum membentuk biofilm, sementara sel-sel dalam embrio hewan berkomunikasi untuk koordinasi proses diferensiasi menjadi berbagai jenis sel.

Komunikasi sel terdiri dari proses transfer sinyal antarsel dalam bentuk molekul (misalnya hormon) atau aktivitas listrik, dan transduksi sinyal di dalam sel target ke molekul yang menghasilkan respons sel. Mekanisme transfer sinyal dapat terjadi dengan kontak antarsel (misalnya melalui sambungan pengomunikasi), penyebaran molekul sinyal ke sel yang berdekatan, penyebaran molekul sinyal ke sel yang jauh melalui saluran (misalnya pembuluh darah), atau perambatan sinyal listrik ke sel yang jauh (misalnya pada jaringan otot polos). Selanjutnya, molekul sinyal menembus membran secara langsung, lewat melalui kanal protein, atau melekat pada reseptor berupa protein transmembran pada permukaan sel target dan memicu transduksi sinyal di dalam sel. Transduksi sinyal ini dapat melibatkan sejumlah zat yang disebut pembawa pesan kedua (*second messenger*) yang konsentrasinya meningkat setelah pelekatan molekul sinyal pada reseptor dan yang nantinya meregulasi aktivitas protein lain di dalam sel. Selain itu, transduksi sinyal juga dapat dilakukan oleh sejumlah jenis protein yang pada akhirnya dapat memengaruhi metabolisme, fungsi, atau perkembangan sel.<sup>[63][64]</sup>

## **REGULASI SIKLUS SEL**

Setiap sel berasal dari pembelahan sel sebelumnya, dan tahap-tahap kehidupan sel antara pembelahan sel ke pembelahan sel berikutnya disebut sebagai siklus sel. Pada kebanyakan sel, siklus ini terdiri dari empat proses terkoordinasi, yaitu

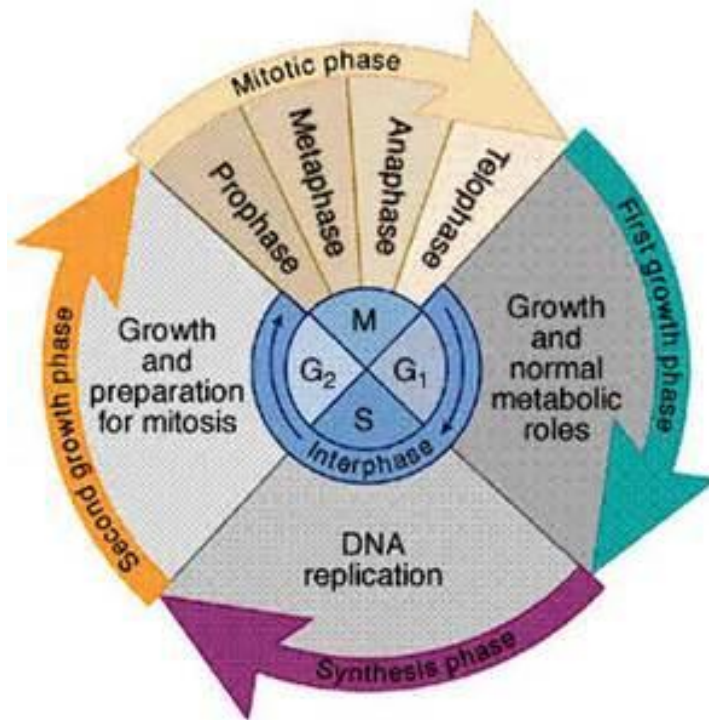
1. Pertumbuhan sel.
2. Replikasi DNA.

3. Pemisahan DNA yang sudah digandakan ke dua calon sel anakan.
4. Pembelahan sel.

Pada bakteri, proses pemisahan DNA ke calon sel anakan dapat terjadi bersamaan dengan replikasi DNA, dan siklus sel yang berurutan dapat bertumpang tindih. Hal ini tidak terjadi pada eukariota yang siklus selnya terjadi dalam empat fase terpisah sehingga laju pembelahan sel bakteri dapat lebih cepat daripada laju pembelahan sel eukariota.

Pada eukariota, tahap pertumbuhan sel umumnya terjadi dua kali, yaitu sebelum replikasi DNA (disebut *fase G<sub>1</sub>*, *gap 1*) dan sebelum pembelahan sel (*fase G<sub>2</sub>*). Siklus sel bakteri tidak wajib memiliki fase *G<sub>1</sub>*, namun memiliki fase *G<sub>2</sub>* yang disebut periode D. Tahap replikasi DNA pada eukariota disebut *fase S* (sintesis), atau pada bakteri ekuivalen dengan periode C. Selanjutnya, eukariota memiliki tahap pembelahan nukleus yang disebut *fase M* (mitosis).

Peralihan antar tahap siklus sel dikendalikan oleh suatu perlengkapan pengaturan yang tidak hanya mengkoordinasi berbagai kejadian dalam siklus sel, tetapi juga menghubungkan siklus sel dengan sinyal ekstrasel yang mengendalikan perbanyakan sel. Misalnya, sel hewan pada fase *G<sub>1</sub>* dapat berhenti dan tidak beralih ke fase *S* bila tidak ada faktor pertumbuhan tertentu, melainkan memasuki keadaan yang disebut fase *G<sub>0</sub>* dan tidak mengalami pertumbuhan maupun perbanyakan. Contohnya adalah sel fibroblas yang hanya membelah diri untuk memperbaiki kerusakan tubuh akibat luka. Jika pengaturan siklus sel terganggu, misalnya karena mutasi, risiko pembentukan tumor—yaitu perbanyakan sel yang tidak normal—meningkat dan dapat berpengaruh pada pembentukan kanker.



Gambar 11: Gambar siklus sel

Siklus sel pada sel eukariotik merupakan suatu tahapan kompleks meliputi penggandaan materi genetik, pengaturan waktu pembelahan sel, dan interaksi antara protein dan enzim. Siklus sel pada sel eukariotik dapat dibagi menjadi 4 tahap, yaitu: G1 (Gap 1), S (Sintesis), G2 (Gap 2), dan M (Mitosis). Tahap G1 merupakan selang antara tahapan M dengan S. Pada tahap ini sel terus tumbuh dan melakukan persiapan untuk sintesis DNA. Sel akan melakukan sintesis DNA dan terjadi proses replikasi kromosom pada saat berada di tahap S. Pada tahap G2, sel yang telah mereplikasi kromosom akan menduplikasi keseluruhan komponen seluler lainnya. Selain itu terjadi pula sintesis mRNA dan beberapa protein tertentu.

Secara umum tahap G0, G1, S, dan G2 disebut juga sebagai tahap interfase. Sedangkan pembelahan sel atau sering disebut dengan tahap mitosis, terdiri dari empat subtahapan, yaitu profase, metafase, anafase, dan telofase. Pada kondisi tertentu, sel-sel yang tidak membelah, karena tidak berdiferensiasi, meninggalkan tahap G1 dan pindah ke dalam tahap G0. Sel-sel yang berada dalam tahap G0 sering disebut sedang beristirahat/ diam (quiescent).

Pada proses perkembangan sel dikenal beberapa tipe siklus sel yaitu:

1. Siklus sel embrionik.
2. Siklus sel somatic.

3. Siklus endoreduplikasi.
4. Siklus sel meiosis.

Masing-masing tipe siklus sel mempunyai komponen protein dan enzim yang berbeda dalam regulasi siklus sel. Dalam tinjauan pustaka ini hanya akan dibahas regulasi pada siklus sel embrionik dan sel somatis.

a. Protein, Enzim dan Inhibitor

Masing-masing enzim mempunyai komponen protein dan inhibitor yang spesifik pada setiap tahap siklus pembelahan sel. Enzim yang berperan secara dominan dalam regulasi siklus pembelahan sel adalah

1. MPF (Maturation/ Meiosis/Mitosis-Promoting Factor).

MPF merupakan suatu enzim heterodimer yang terdiri dari  $p34^{cdc2}$  sebagai suatu subunit katalitik dan cyclins sebagai suatu subunit regulatorik. Cdk (Cyclin dependent kinase) adalah nama lain dari  $p34^{cdc2}$ ; 34kDa.

$cdc2$  merupakan gen siklus pembelahan sel yang mengkode enzim Cdk pada siklus sel mamalia. Cdk merupakan protein kinase yang aktivitasnya diregulasi oleh keadaan terfosforilasi pada saat berikatan dengan cyclin. Selama siklus pembelahan sel, jumlah Cdk relatif sama, namun jumlah cyclin bervariasi pada tiap tahapan. Pada keadaan *in vitro*, Cdk dapat memfosforilasi sejumlah cyclin bervariasi tiap tahapan.

Pada keadaan *in vitro*, Cdk dapat memfosforolasi sejumlah protein yaitu histone H1, nuclear lamins, RNA polymerase II, p60src, antigen T, dan faktor elongasi. Fosforilasi histone H1 secara *in vitro* telah digunakan sebagai dasar dalam teknik biokimia pada penentuan dan pengukuran aktivitas enzim Cdk. Pada keadaan *in vivo*, aktivasi Cdk akan memacu sel masuk ke dalam tahap M dan menyebabkan pecahnya membrane inti (NEBO= *Nuclear Envelope Breakdown*), kromosom mengalami kondensasi, penyusunan kembali sitoskeleton, dan duplikasi *centrosome*. Aktivitas Cdk dikontrol oleh asosiasi dengan cyclin, sintesis dan proteolisis oleh Cdk sendiri, modifikasi posttranslasi, dan interaksi dengan sejumlah inhibitor kinase alami (CDI= Cyclin-dependent kinase Inhibitor). Faktor cekaman luar yang tinggi akan meningkatkan ekspresi CDI dan menyebabkan siklus sel terganggu/terhenti. Secara garis besar ada 2 golongan CDI, yaitu: golongan Ink4 (p15, p16, p18, p19) dan golongan Cip/Kip (p21<sub>cip1</sub>, p27<sub>kip1</sub>, p57<sub>kip2</sub>).

2. APC (Anaphase-Promoting Complex).

APC merupakan suatu multi-subunit ubiquitin ligase yang berperan dalam regulasi transisi pada siklus sel. APC tersusun oleh protein yang berasosiasi salah satu atau kedua aktivatornya yaitu: Cdc20 dan Cdh1, untuk mengarahkan polyubiquitylation pada securin, cyclin, dan regulator siklus sel lain yang akan didegradasi oleh



proteasome. Cdc20 merupakan substrat target pada awal mitosis, sedangkan Cdh1 merupakan substrat target pada akhir mitosis dan selama memasuki tahap G<sub>1</sub>.

### 3. CSF (Cytostatic Factor).

#### b. Mekanisme Regulasi

Pada umumnya sel-sel eukaryotik yang telah menyelesaikan pembelahan pada tahap M akan masuk ke dalam tahap G<sub>1</sub> untuk kembali melakukan pembelahan atau masuk ke dalam tahap G<sub>0</sub> untuk beristirahat/ diam. Sel dapat keluar dari tahap G<sub>1</sub> dan masuk ke dalam tahap G<sub>0</sub>, apabila berada dalam suatu kondisi tanpa faktor pertumbuhan. Sel-sel yang dikultur pada medium sedikit kadar serum tetap akan melakukan siklus sel G<sub>1</sub>-S-G<sub>2</sub>-M, namun setelah keluar dari tahap M akan langsung masuk ke tahap G<sub>0</sub>. Penambahan serum atau faktor pertumbuhan akan menginduksi sel untuk masuk kembali ke siklus sel sampai ke titik restriksi untuk proses berikutnya. Setelah melewati titik restriksi (protein Rb terfosforilasi), regulasi siklus sel tidak bergantung pada sinyal ekstraselular.

Sel yang berada pada tahap G<sub>0</sub> sinyal faktor pertumbuhan ekstra seluler akan menginduksi cyclin D, CDI, dan Cyclin E. Pada tahap G<sub>1</sub> serangkaian reaksi biokimia akan membuat Rb terfosforilasi sehingga faktor transkripsi E2F terlepas dan aktif menstimulasi sintesis protein tahap S. Kedua CDI ini berikatan dengan cyclin D-Cdk4 tapi tidak menghambat aktivitas kinasenya dan hasil penelitian menunjukkan bahwa p21cip1 dan p27kip1 justru dibutuhkan untuk pembentukan dan impor cyclin D-Cdk4 oleh inti. Kedua CDI tersebut efektif menghambat aktivitas cyclin E-Cdk2. Dengan demikian keberadaan protein CDI di tahap G<sub>1</sub> adalah untuk memacu pembentukan kompleks aktif cyclin D-Cdk4 dan pada saat bersamaan menunda/ menghambat aktivasi dari kompleks cyclin E-Cdk2.

Protein Rb merupakan penghambat transkripsi, karena keberadaannya menonaktifkan E2F yang berperan sebagai faktor transkripsi. Setelah protein yang diperlukan dalam tahap S dihasilkan dari transkripsi, maka cyclin D-Cdk4, cyclin D-Cdk6, dan cyclin E-Cdk2 akan bersamasama memfosforilasi protein Rb, p107 dan p130 menjadi tidak aktif sama sekali. Hal ini akan mengaktifkan secara penuh proses transkripsi pada tahap S. Dengan demikian sel tersebut telah memasuki tahap S pada siklus sel. Pada sel mamalia jenis Cdk dan cyclin yang ditemukan pada masa transisi tahap G<sub>1</sub>/S adalah Cdk2 (p33), Cdk4, Cdk6, serta cyclin A, D1, D2, D3, dan E11.

Pada tahap S, kompleks cyclin E-Cdk2 berperan menginisiasi replikasi DNA. Selain itu cyclin A-Cdk2 juga berperan dalam menginisiasi replikasi DNA secara lengkap dan meningkatkan ekspresi histon dan beberapa gen/protein yang akan dibutuhkan saat replikasi.

Pada tahap G<sub>2</sub>, terjadi peningkatan sintesis cyclin B yang akan mencapai tingkat konsentrasi maksimal pada saat tahap M. Pada sel mamalia jenis Cdk dan cyclin yang ditemukan pada masa transisi tahap G<sub>2</sub>/M adalah Cdk1 (Cdc2) serta cyclin A, B1, dan B2.

Setelah tumbuh dan menduplikasi komponen sel, maka sel akan melakukan pembelahan menjadi dua sel anakan yang terjadi pada tahap M. Pada tahap M (profase, metafase, anafase, dan telofase), defosforilasi dan aktivasi cyclin B-Cdk1 berpengaruh terhadap perubahan morfologi selama mitosis berlangsung. Substrat dari cyclin B-Cdk1 adalah nuclear lamins, protein nucleolar, protein centrosomal, dan Eg5.

Pada subtahap profase – metafase, konsentrasi MPF berada pada level tertinggi dan akan mengalami penurunan pada subtahap berikutnya. Sebelum memasuki subtahap berikutnya (anafase), sel oosit yang telah mencapai metafase pada meiosis II (MII), akan tertahan pada kondisi tersebut karena pengaruh CSF. Komponen utama CSF adalah golongan Emi yaitu Emi1 (Early Mitotic Inhibition 1) dan Emi2. Apabila terjadi fertilisasi atau partenogenesis, masuknya sperma akan mengaktivasi  $Ca^{2+}$ /calmodulin-dependent protein

kinase II (CaMKII) dalam sitoplasma. CaMKII akan memfosforilasi protein yang mengekspresikan CSF, sehingga ekspresi CSF terhambat. Selain itu CSF juga akan terdegradasi oleh sistem ubiquitin/ proteasome. CSF yang mengalami degradasi menyebabkan APC dapat berperan aktif, sehingga sel oosit keluar dari tahap metafase dan masuk ke dalam anafase. APC berperan sangat dominan pada tahap anafase. Salah satu peranan APC adalah menghancurkan cyclin A dan cyclin B yang mengaktifkan MPF, sehingga konsentrasi MPF akan turun drastis seiring selesainya tahap M.

## KESIMPULAN

1. Sel merupakan unit structural terkecil dari organisme hidup.
2. Secara struktural, sel merupakan satuan terkecil makhluk hidup yang dapat melaksanakan kehidupan, yang merupakan unit terkecil penyusun makhluk hidup. Secara fungsional, sel berfungsi untuk menjalankan fungsi kehidupan (menyelenggarakan kehidupan jika sel-sel penyusunnya berfungsi), kemudian membentuk organisme.
3. Setiap organisme tersusun atas salah satu dari dua jenis sel yang secara struktur berbeda: sel prokariotik atau sel eukariotik. Kedua jenis sel ini dibedakan berdasarkan posisi DNA di dalam sel; sebagian besar DNA pada eukariota terselubung membran organel yang disebut nukleus atau inti sel, sedangkan prokariota tidak memiliki nukleus.
4. Fungsi sel adalah

- a. Metabolisme: Keseluruhan reaksi kimia yang membuat makhluk hidup mampu melakukan aktivitasnya.
  - b. Kemampuan sel untuk berkomunikasi, yaitu menerima dan mengirimkan 'sinyal' dari dan kepada sel lain, menentukan interaksi antarorganisme uniseluler serta mengatur fungsi dan perkembangan tubuh organisme multiseluler.
5. Setiap sel berasal dari pembelahan sel sebelumnya, dan tahap-tahap kehidupan sel antara pembelahan sel ke pembelahan sel berikutnya disebut sebagai siklus sel. Pada proses perkembangan sel dikenal beberapa tipe siklus sel yaitu: Siklus sel embrionik, Siklus sel somatic, Siklus endoreduplikasi, Siklus sel miosis.

## DAFTAR PUSTAKA

Harry Murti, dkk.2007. Regulasi Siklus Sel: Kunci Sukses *Somatic Cell Nuclear Transfer*. cdk vol. 34 no. 6/159 Nov - Des.

Silbernagl, Stefan. 2000. Atlas Berwarna dan Teks Fisiologi. Edisi pertama. Stuttgart, Germany. Hal: 1-21.

Silbernagl, Stefan. 2007. Atlas Berwarna dan Teks Patofisiologi. Edisi pertama. Stuttgart, Germany. Hal: 1-19.