MODUL 1

Struktur dan Fungsi Sel

Dr. Dadan Rosana, M.Si.

PENDAHULUAN

Mahasiswa super, kita akan mulai belajar Biofisika ini dengan mendiskusikan tentang suatu bagian yang sangat penting dalam tubuh kita dan tubuh makhluk hidup lainnya. Pada modul ini, kita akan membahas suatu kesatuan struktural, fungsional, dan herediter terkecil dari makhluk hidup yang berupa ruangan kecil yang dibatasi oleh selaput dan berisi cairan pekat yang dikenal dengan sebutan sel. Sel merupakan unit (satuan, zarah) terkecil dari makhluk hidup, yang dapat melaksanakan kehidupan. Sel disebut sebagai unit terkecil karena tidak dapat dibagi-bagi lagi menjadi bagian yang lebih kecil yang berdiri sendiri. Secara struktural, tubuh makhluk hidup tersusun atas sel-sel sehingga sel disebut satuan struktural makhluk hidup. Secara fungsional, tubuh makhluk hidup dapat menyelenggarakan kehidupan jika sel-sel penyusun itu berfungsi. Karena itu sel juga disebut satuan fungsional makhluk hidup. Sel mengandung materi genetik, yaitu materi penentu sifat-sifat makhluk hidup. Dengan adanya materi genetik, sifat makhluk hidup dapat di wariskan kepada keturunannya. Bahasan ini sangat penting untuk dipahami oleh Anda yang mengambil mata kuliah Biofisika, sebagai langkah awal untuk memahami proses-proses fisis dan kimiawi pada makhluk hidup.

Ada tiga kegiatan belajar dalam modul ini, yaitu *pertama*, mengenai struktur dan fungsi sel yang akan membahas mengenai struktur sel, fungsi organ-organ sel, dan model fisis sel. *Kedua*, mengenai membran sel yang akan membahas mengenai struktur membran sel, transpor melalui membran, serta persamaan Nernst dan Galdman. *Ketiga*, mengenai metabolisme dan transformasi energi yang akan membahas mengenai metabolisme sel, transformasi energi, proses fotosintesis, dan metabolisme karbohidrat.

Dengan mempelajari modul ini diharapkan Anda memiliki kemampuan untuk menganalisis sel sebagai unit terkecil sistem biologi yang sekaligus memahami karakteristiknya. Selain itu, juga diharapkan Anda dapat menganalisis struktur dan fungsi membran sel serta proses-proses fisis maupun

kimiawi yang menyertainya. Dengan demikian, akan didapatkan gambaran yang jelas mengenai proses biologis dan fisis sebagai bahasan utama dalam mata kuliah Biofisika ini.

Mahasiswa super, secara lebih khusus modul ini, memberikan kemampuan pada Anda agar dapat:

1. menjelaskan struktur sel sebagai unit terkecil sistem biologi;
2. menjelaskan fungsi organ-organ sel;
3. menganalisis model fisis sel;
4. menganalisis struktur membran sel;
5. menganalisis transpor melalui membran;
6. menganalisis persamaan Nernst dan Goldman;
7. menganalisis metabolisme sel;
8. menganalisis transformasi energi;
9. menjelaskan proses fotosintesis;
10. menjelaskan metabolisme karbohidrat.

Dalam mempelajari modul ini diharapkan Anda telah memiliki bekal pengetahuan dan pemahaman mengenai beberapa topik dalam ilmu fisika seperti mekanika, listrik magnet, fluida, dan getaran bunyi.

Selamat belajar, semoga Anda berhasil!

KEGIATAN BELAJAR 1

Struktur dan Fungsi Sel

Semua makhluk hidup, baik manusia, hewan, tumbuhan, maupun mikroba terdiri atas kumpulan sel. 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. Sel merupakan kesatuan struktural, fungsional, dan herediter terkecil dari makhluk hidup yang berupa ruangan kecil yang dibatasi oleh selaput dan berisi cairan pekat. Dalam Becker, *et al* (2000:2) disebutkan bahwa sel merupakan suatu unit dasar biologi. Sel tersebut berasal dari sel yang ada sebelumnya dan memiliki kehidupannya sendiri di samping peranan gabungannya di dalam organisme multisel. 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 pembelahan sel telur induknya yang sudah dibuahi.

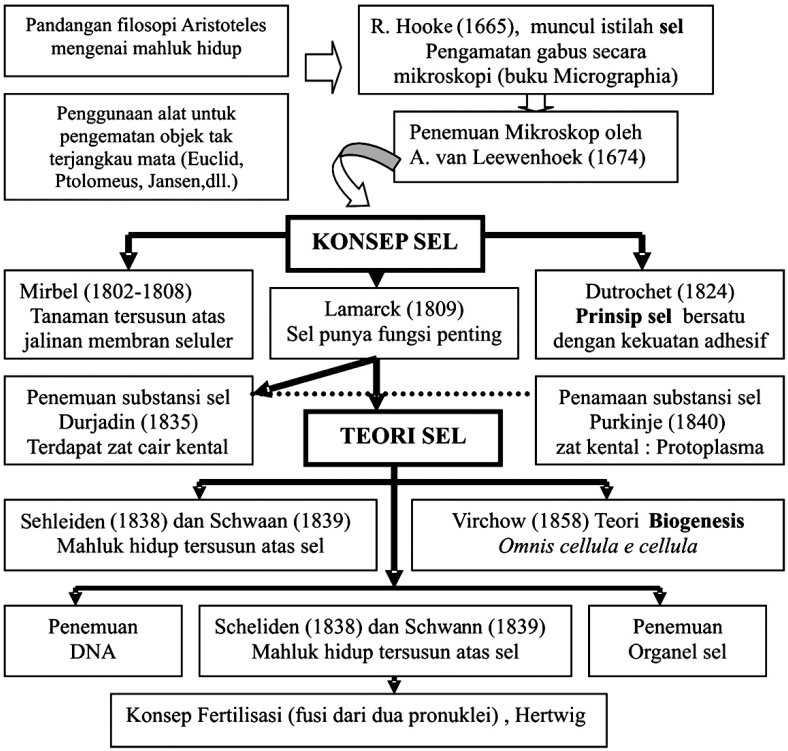
Istilah sel pertama kali dikemukakan oleh Robert Hooke pada tahun 1667 (Issoegianti, 1993:2), yang sebelumnya pada tahun 1665 menerbitkan micrographia yang memuat hasil pengamatannya pada gabus secara mikroskopik. Pada saat itu, manusia belum memiliki alat yang dapat digunakan untuk melihat sel yang memiliki bentuk sangat kecil dan tidak dapat dilihat dengan mata telanjang. Sel dapat lebih dipelajari setelah ditemukannya mikroskop oleh Anton van Leeuwenhoek pada tahun 1674. 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.

Kurang lebih 200 tahun kemudian, Dutrochet, von Schleiden, dan Schwamn menegaskan penemuan Hooke. Pada tahun 1824, R. J. H. Dutrochet mengemukakan prinsip sel yang menyatakan bahwa semua hewan dan

tumbuhan terdiri dari sel yang tetap bersatu oleh adanya kekuatan adhesif. Kemudian pada tahun 1838, M. J. Scheleiden menerbitkan buku yang memuat pengertian mengenai genesis jaringan tumbuhan. Scheleiden menemukan adanya nukleoli dan mengemukakan mengenai teori sel pada tumbuhan. Sementara itu, satu tahun berikutnya, T. Schwaan mengemukakan mengenai teori sel pada hewan. Teori sel menyebutkan bahwa makhluk hidup tersusun atas sel. Penemuan teori sel di atas seiring dengan temuan Durjadin pada tahun 1835 yang menemukan bahwa di dalam sel terdapat suatu zat yang kental, yang sekarang dikenal dengan nama protoplasma.

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. Pada pertengahan Abad 19, pada tahun 1958, R. Virchow mengemukakan teori biogenesis yang mengoreksi teori abiogenesis. Teori biogenesis menyatakan bahwa semua sel hidup berasal dari sel yang telah ada. Konsep tersebut populer dengan *omnis cellule cellula*. Selanjutnya, pada Abad 20 banyak ahli yang menemukan berbagai jenis struktur dan bentukan yang terdapat dalam sel. Misalnya pada tahun 1867, L. ST. George menemukan organela sel yang sekarang ini disebut komplek-golgi. Pada tahun 1869, F. Meischer menemukan nuklein, dan pada tahun 1887, van Beneden menemukan sentriol.

Penemuan-penemuan penting mengenai sel terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan ditemukannya alat-alat canggih. Hingga saat ini diketahui bahwa struktur dan kegiatan sel tidak sesederhana seperti yang diduga semula. Untuk lebih jelasnya skema perkembangan sel dan teori sel dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

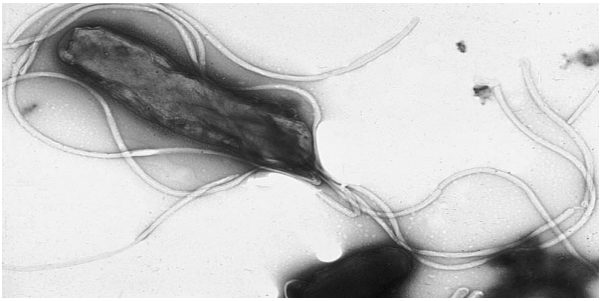


Gambar 1.1
Skema Perkembangan Sel dan Teori Sel

Sel merupakan unit kehidupan terkecil. Semua organisme yang hidup sekarang ini, berasal dari sebuah sel induk yang ada pada berjuta-juta tahun yang lalu. Sel ini mengalami evolusi yang berlangsung secara bertahap untuk menyesuaikan dengan lingkungannya. Berdasarkan perubahan ini, maka sekarang sel dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu sel prokariotik (*prokaryotic*) dan sel eukariotik (*eukaryotic*). Istilah prokariotik dan eukariotik mula-mula digunakan oleh Hans Ris pada tahun 1960.

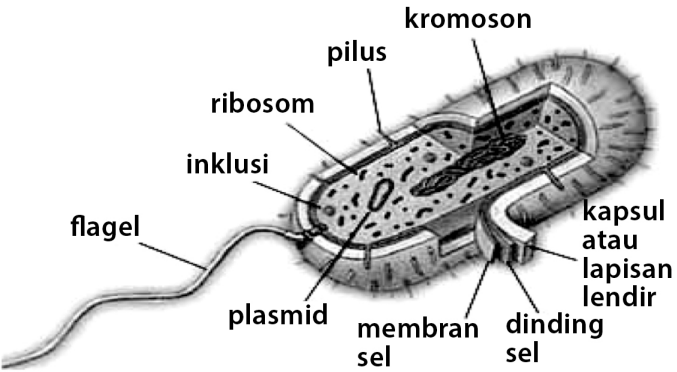
A. SEL PROKARIOTIK

Sel prokariotik (*pro*: sebelum, *karyot*: inti/nukleus) merupakan sel yang tidak memiliki membran nukleus, hal ini menyebabkan nukleus bercampur atau mengadakan hubungan langsung dengan sitoplasma. Ukuran dari sel prokariotik sangat kecil, yaitu 1−10 μm. Contoh dari sel prokariotik adalah pada *mycoplasma*, bakteri dan ganggang biru.



Sumber: http://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:EMpylori.jpg

Gambar 1.2a
Sel Bakteri



Sumber: http\\www.cellsalive.com/cells

Gambar 1.2b
Struktur Sel Bakteri

Pada umumnya, sel prokariotik memiliki empat bagian pokok dengan struktur dan fungsi masing-masing bagian. Berikut ini uraiannya.

1. Dinding Sel

Dinding sel prokariotik terdiri dari bermacam-macam bahan organik, seperti selulosa, hemiselulosa, dan kitin. Pada beberapa bakteri, di luar dinding sel masih diselubungi oleh struktur tambahan yang disebut kapsula. Fungsi dari dinding sel adalah untuk memberi bentuk tertentu pada sel, sebagai pelindung yang kuat, juga untuk mengatur keluar masuknya zat kimia ke dalam sel.

2. Membran Plasma

Membran plasma merupakan pembungkus protoplasma dan sering disebut dengan *plasmalema* atau lapisan *hialin*. Membran plasma terdiri dari protein dan lipida. Pada tempat-tempat tertentu membran plasma ini berlipat-lipat dan membentuk suatu bangunan yang disebut *mesosoma*. Mesosoma sering disebut *kondrioid* yang berperan sebagai pengatur pembelahan dan fotosintesis bagi bakteri fotosintesis.

3. Sitoplasma

Sitoplasma sering disebut protoplasma atau plasma sel. Sitoplasma merupakan suatu koloid yang banyak mengandung karbohidrat, protein, enzim, belerang, kalsium karbonat, dan volutin yang banyak mengandung asam *ribonukleat* (ARN) dan mudah menghisap warna yang bersifat basa. Sel prokariotik tidak memiliki plastid otonom seperti mitokondria dan kloroplas. Enzim-enzim pengangkutan elektron terdapat dalam selaput sel. Bahan cadangan disimpan dalam bentuk granula-granula sitoplasma yang tidak larut. Di dalam sitoplasma terdapat nukleoid dan ribosom.

a. Nukleoid

Nukleoid merupakan bahan informasi genetik, di dalamnya terdapat asam Deoksiribonukleat (AND).

b. Ribosom

Ribosom terdapat pada semua sel, yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya sintesis protein. Ribosom terdiri dari dua komponen yaitu molekul asam ribonukleat (RNA) dan molekul protein. Pada sel prokariotik, ribosom terdapat bebas di sitosol, dan jumlah ribosom dari dalam suatu sel

sangat banyak dan berbeda-beda sesuai dengan macam organismenya. Ribosom memiliki diameter kurang lebih 15 nm.

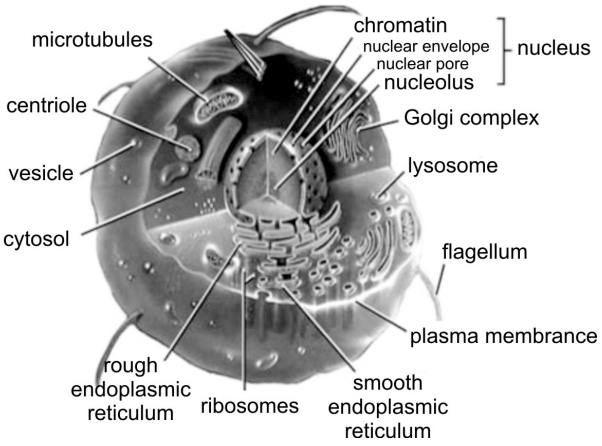
4. Flagela

Strukturnya berupa tali yang keluar dari permukaan sel, mampu bergerak untuk menggerakkan sel. Alat ini berasal dari granula basal yang terdapat di sitoplasma. Di tengahnya terdapat sebuah filamen yang terdiri dari senyawa protein yang disebut flagelin.

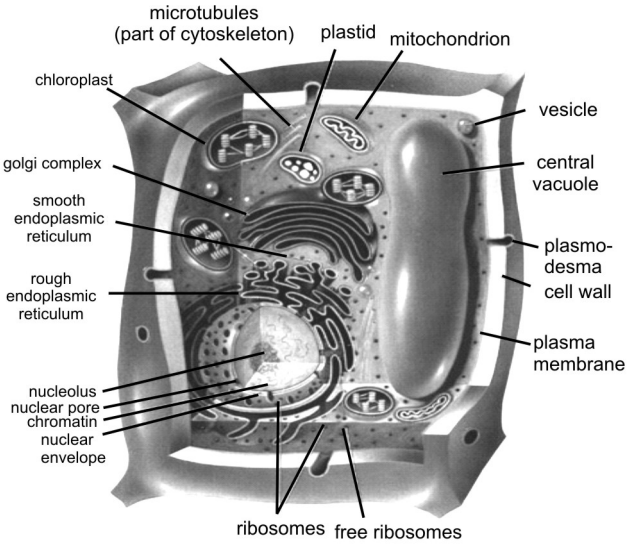
B. SEL EUKARIOTIK

Eukariotik (*eu*: sejati, dan *kariot:* nukleus/inti) adalah sel dengan nukleus sejati. Sel ini dibungkus oleh membran nukleus sehingga isinya tidak bercampur dengan sitoplasma. Perbedaan yang paling mencolok dari sel prokariotik adalah nukleus sejati yang membungkus sebagian besar DNA sel sehingga DNA tersimpan dalam kompartemen yang berbeda dari sitoplasma.

Untuk lebih memahaminya maka di bawah ini ditunjukkan model sel eukariotik, dalam bentuk tiga dimensi dan dua dimensi. Bagian-bagian sel yang digambarkan di bawah ini secara khusus akan dibahas lebih lanjut dalam kegiatan belajar ini. Sedangkan khusus mengenai membran sel akan dibahas secara lebih rinci pada Kegiatan Belajar 2.

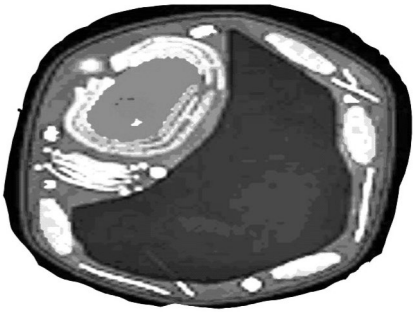


Gambar 1.3
Model Sel Eukariotik dalam Tiga Dimensi (Sel Hewan)



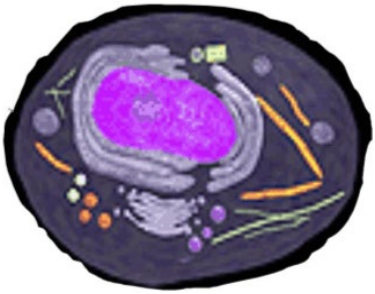
Gambar 1.4
Model Sel Eukariotik dalam Dua Dimensi

Di samping itu kita pun dapat melihat perbedaan antara sel tumbuhan dan hewan dengan memperhatikan model di bawah ini.



Sumber: http.www.cellsalive.com/cells.

Gambar 1.5
Sel Tumbuhan



Sumber: http.www.cellsalive.com/cells.

Gambar 1.6
Sel Hewan

Suatu susunan sel dilukiskan dalam Gambar 1.5. Sel tumbuhan dan Gambar 1.6. Sel hewan, yang menggambarkan bentuk aneka jenis sel.

Jika kita perhatikan tumbuhan dan hewan memiliki perbedaan yang sangat besar, dalam hal ini tumbuhan tidak dapat bergerak dengan aktif seperti hewan. Hal ini disebabkan karena bentuk sel tumbuhan yang kaku sehingga tidak fleksibel, berbeda dengan sel hewan yang fleksibel dan bentuknya dapat berubah-ubah. Selain dari bentuknya, perbedaan sel tumbuhan dan sel hewan juga dapat dibedakan dari hal-hal berikut ini.

Tabel 1.1
Perbedaan sel tumbuhan dan sel hewan

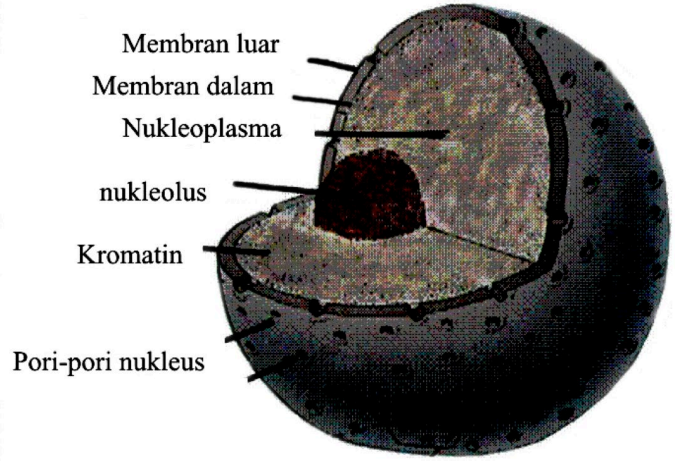
Sel Tumbuhan	Sel Hewan
1. Sel tumbuhan lebih besar dari sel Hewan 2. Tidak memiliki lisosom 3. Tidak memiliki sentrosom 4. Memiliki dinding sel dan membran sel 5. Umumnya memiliki plastida 6. Mempunyai bentuk yang tetap 7. Memiliki vakuola ukuran besar, banyak	1. Sel Hewan lebih kecil dari sel Tumbuhan 2. Tidak memiliki plastida 3. Tidak memiliki dinding sel 4. Memiliki lisosom 5. Memiliki sentrosom 6. Mempunyai bentuk tidak tetap 7. Tidak memiliki vakuola (walaupun ada juga yang memiliki vakuola tapi ukuran kecil)

Ada dua bagian utama sel, yaitu inti dan isinya sering kali disebut nukleoplasma, dan bagian sisanya yang disebut sitoplasma. Inti dan sitoplasma itu dikelilingi oleh membran, demikian pula bagian yang lebih kecil seperti

mithokhondria dan benda-benda golgi. Berikut ini, struktur dan fungsi dari masing-masing komponen sel secara garis besar.

1. Nukleus

Nukleus adalah organel yang paling menonjol dalam sel. Organ kecil ini dipisahkan dari sitoplasma (plasma sel) oleh pembungkus yang terdiri dari dua membran, membran dalam dan membran luar. Nukleus mengandung material genetik, yaitu Asam Deoksi Ribonukleat (ADN) yang terbungkus dalam sebuah membran nukleus. Semua DNA kromosom tersimpan di dalam nukleus, terkemas dalam serat-serat kromatin berkat persekutuannya dengan protein-protein histon yang sama massanya. Isi nukleus berkomunikasi dengan sitosol melalui lubang-lubang pada pembungkusnya yang disebut pori-pori nukleus. Dalam nukleus terdapat nukleolus sebuah tempat untuk memproduksi ribosoma sel.



Sumber: The Science of Biology, 4th Edition, by Sinauer Associates (www.sinauer.com).

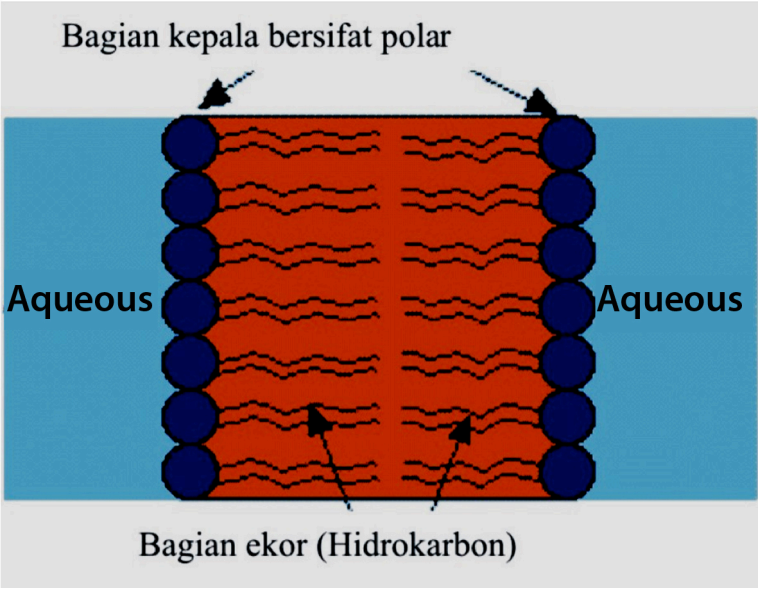
Gambar 1.7
Struktur Nucleus

2. Membran Plasma

Merupakan membran yang sangat tipis dan bersifat selektif permeabel dengan ukuran 7,5−10 nm. Membran plasma merupakan lapisan lipid ganda (bilayer), yaitu dengan struktur molekul dua lapis. Lipid yang terpenting adalah

fosfolipid dan sedikit glikolipid serta kemungkinan mengandung kolesterol. Struktur membran plasma yang demikian mendukung sel untuk dapat memanfaatkan perubahan-perubahan permeabilitas ion yang terkendali pada membran plasma untuk keperluan komunikasi sel. Di samping itu, juga berfungsi sebagai pelindung organel-organel dalam sel.

Berbeda dari membran plasma sel prokariotik maka membran plasma dalam sel eukariotik dapat mengembangkan kemampuan atau spesialisasi organel. Pada sel prokariotik yang tidak memiliki mitokondria, membran plasma juga bertugas melaksanakan metabolisme energi. Perbedaan inilah yang menyebabkan bahwa pada sel eukariot, membran plasmanya tidak membentuk mesosom.

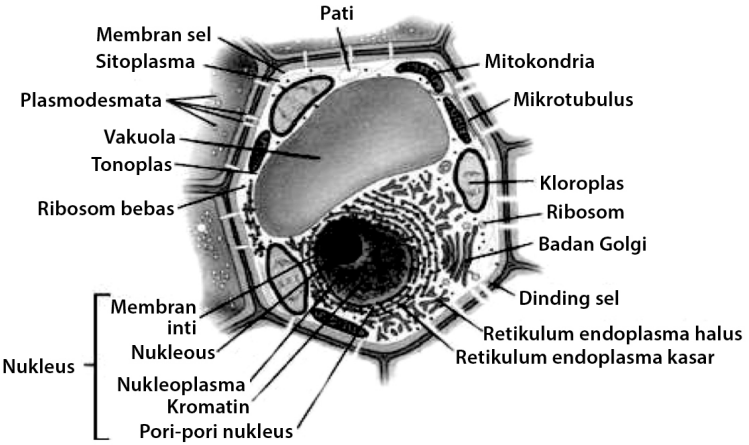


Gambar 1.8
Membran Plasma

Bahasan mengenai membran plasma akan lebih rinci pada Kegiatan Belajar

3. Organel Sel

Jumlah organel pada sitoplasma sel eukariotik lebih kompleks dibandingkan sel prokariot. Organel tersebut misalnya: mitokondria, retikulum endoplasma, nukleus, ribosom, mikrotubula, dan lain-lain.



Sumber: Biology: Exploring Life, 1994

Gambar 1.9
Organel Sel

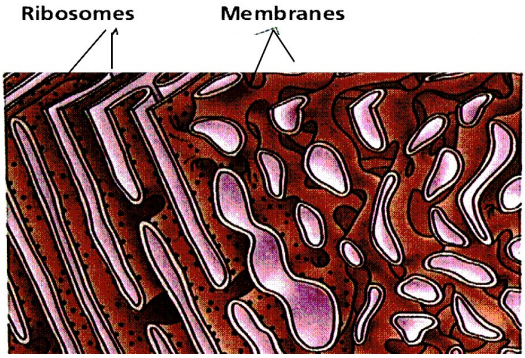
a. Retikulum endoplasma (*endoplasmic retikulum*)

Retikulum endoplasma (RE) merupakan labirin membran yang demikian banyak sehingga meliputi separuh lebih dari total membran dalam sel eukariot. Kata endoplasmik berarti `*di dalam sitoplasma*' dan retikulum diturunkan dari bahasa latin yang berarti jaringan. RE ini terdiri dari jaringan tubula dan gelembung membran yang disebut sisternal atau lumen. Membran RE memisahkan ruang internal, yaitu ruangan sisternal dari sitosol. Dan karena membran RE ini bersambung dengan selubung nukleus, ruangan di antara kedua membran selubung itu bersambung dengan ruangan sisternal RE ini.

Secara umum, RE memiliki fungsi sebagai berikut.

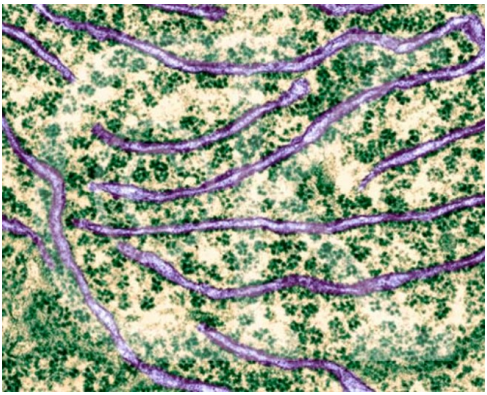
1) pelaku aktivitas metabolik sintetik, karena mengandung berbagai macam enzim;
2) denaturasi dan elongasi asam lemak;
3) memberi permukaan yang luas untuk reaksi enzimatik;

4) merupakan skeleton ultra struktur yang memberikan kekuatan mekanik sel, pada matriks sitoplasma koloidalnya;
5) sebagai tempat pertukaran molekul melalui proses osmosis, difusi dan transpor aktif untuk membran RE dan eksosistosis;
6) membentuk bungkus inti baru pada pembelahan sel;
7) fungsi proteksi sel karena membran RE mampu menghilangkan efek toksik zat melalui proses detoksifikasi.



Sumber: The Science of Biology, 4th Edition, by Sinauer Associates. www.sinauer.com) and WH Freeman (www.whfreeman.com).

Gambar 1.10
Retikulum Endoplasma



Sumber: www.DennisKunkel.com.

Gambar 1.11
Foto menggunakan Mikroskop Elektron dari Retikulum
Endoplasma dan Ribosom (TEM x 61,560)

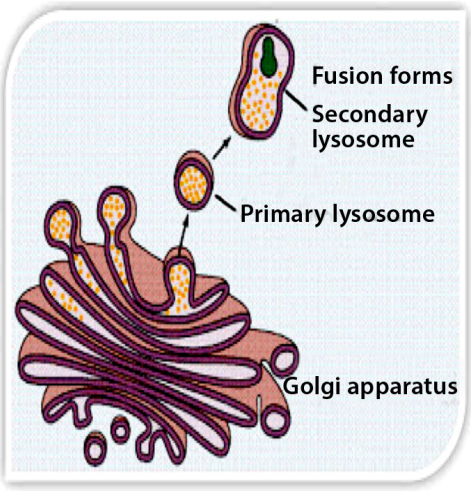
b. Badan golgi (*golgi apparatus/golgi complexes*)

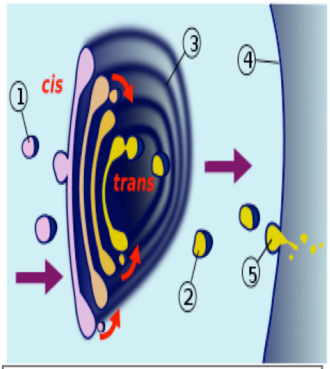
Organela ini ditemukan pertama kali oleh **Camillo Golgi**, seorang ilmuwan dari Italia. Badan golgi biasa dijumpai pada sel tumbuhan maupun hewan. Pada sel hewan terdapat 10-20 badan golgi. Lain halnya dengan tumbuhan yang memiliki ratusan badan golgi pada setiap sel. Badan golgi mempunyai panjang sekitar 1-3 μm dan tinggi sekitar 0,5 μm. Badan golgi termasuk sistem vakuolar sel dan tidak terdapat ribosom. Pada sel berstruktur polar, badan golgi tunggal, besar dan menempati di bagian di antara inti dan kutub sel, misalnya pada sel kelenjar eksokim pankreas. Pada sel hepar dalam satu sel terdapat sekitar 50 kompleks golgi yang bentuknya bervariasi antara sel satu dengan lainnya. Badan golgi terdiri atas sekelompok kantong pipih yang dibatasi membran yang dinamakan *saccula.* Di dekat *saccula* terdapat *vesikel sekretori* yang berupa gelembung bulat. Badan golgi pada tumbuhan disebut dengan *diktiosom*. Pada diktiosom terjadi pembuatan polisakarida dalam bentuk selulosa yang digunakan sebagai bahan penyusun dinding sel.

Berdasarkan pengamatan morfologi dan sitokimia secara *in situ* serta kajian biokimiawi menunjukkan bahwa badan golgi terlibat dalam sejumlah besar kegiatan sel antara lain perakitan protein dan lipid karbohidrat tinggi atau lebih dikenal dengan proses glikosilasi, pemulihan selaput sel, dan sekresi.

Secara umum, fungsi dari badan golgi antara lain:

1. membentuk dinding sel pada tumbuhan;
2. menghasilkan lisosom;
3. membentuk akrosom pada spermatozoa yang berisi enzim untuk memecah dinding sel telur;
4. tempat sintesis polisakarida seperti mukus, selulosa, hemiselulosa, dan pektin (penyusun dinding sel tumbuhan);
5. membentuk membran plasma;
6. membentuk kantong sekresi untuk membungkus zat yang akan dikeluarkan sel, seperti protein, glikoprotein, karbohidrat, dan lemak.





Skema transpor di dalam badan Golgi. 1. Vesikel retikulum endoplasma, 2. Vesikel eksositosis, 3. Sisterna, 4. Membran sel, 5. Vesikel sekresi.

Sumber: The Science of Biology, 4th Edition, by Sinauer Associates. www.sinauer.com) and WH Freeman (www.whfreeman.com)

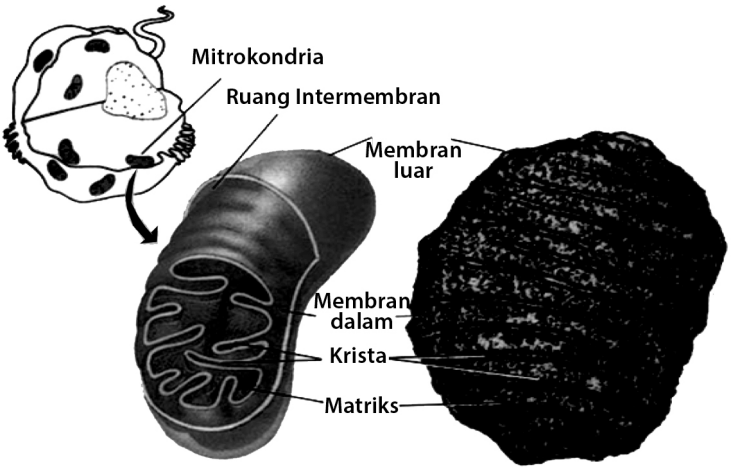
Gambar 1.12
Badan Golgi

c. Mitokondria (*mitochondria*)

Ukuran dan bentuk mitokondria, seperti halnya jumlahnya di dalam sel, bervariasi menurut jaringannya dan menurut keadaan fisiologis sel. Dengan menggunakan mikroskop cahaya mitokondria terlihat berbentuk lonjong, tetapi mitokondria juga bisa berbentuk *dumbbell*, *spherical*, atau raket, dengan diameter 0,5−1,0 μm dan panjangnya sampai 7 μm. Oleh karena ukurannya yang

sangat kecil strukturnya baru dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron.

Mitokondria mengandung sejumlah kecil DNA, RNA, dan ribosom. DNA mitokondria memberikan sandi bagi sintesis protein spesifik tertentu pada membran dalam. Sebagian besar protein mitokondria dikode oleh DNA inti dan sintesis oleh ribosom yang terdapat pada sitosol atau pada retikulum endoplasma. Ini menunjukkan bahwa ada hubungan/transfer informasi dari DNA inti ke mitokondria yang kemudian muncul dari DNA yang ditemukan dalam mitokondria itu sendiri.



Sumber: The Science of Biology, 4th Edition, by Sinauer Associates (www.sinauer.com) and WH Freeman (www.whfreeman.com).

Gambar 1.13
Mitokondria

d. Kloroplas (*chloroplast*)

Tempat fotosintesis adalah organ subseluler yang berstruktur tinggi disebut kloroplas. Hasil kimia fotosintesis adalah perubahan CO_2 dan H_2O menjadi karbohidrat. Karbohidrat yang tersimpan dan dihasilkan sebagai akibat fotosintesis dapat dilihat sebagai butir pati.

4. Membran Dalam

Sel eukariot biasanya mempunyai volume yang jauh lebih besar daripada sel prokariot, biasanya seribu kali atau lebih. Bahan atau material sel yang dikandungnya pun sekian kali lebih banyak. Sebagai contoh bahwa pada sel tubuh manusia mengandung DNA yang seribu kali lebih banyak daripada yang dimiliki oleh bakteri.

Membran dalam berbagai organel seperti membran pada mitokondria, membran vakuola (pada sel tumbuhan), badan golgi dan lainnya merupakan tempat berlangsungnya reaksi penting. Akibat penambahan volume sel maka harus diimbangi dengan penambahan luas permukaan sel dengan mempertahankan nisbah luas permukaan terhadap volume. Hal ini menjelaskan mengapa semua sel eukariot mempunyai ciri dasar berupa banyak dan kompleksnya membran dalam, berupa membran:

a. dalam retikulum endoplasma yang membentuk sebuah kompartemen mirip labirin;
b. dalam badan golgi yang membentuk tumpukan kantong-kantong kempis yang berperan dalam pengubahan molekul-molekul produk dari retikulum endoplasma;
c. lisosom yang mengandung enzim pencernaan sel;
d. pembungkus peroksisom tempat pembentukan dan penguraian H_2O_2 yang reaktif dan berbahaya selama oksidasi bermacam-macam molekul oleh O_2;
e. vakuola (tonoplas) pada sel tumbuhan yang membentuk gelembung-gelembung kecil dan rongga besar berisi cairan.

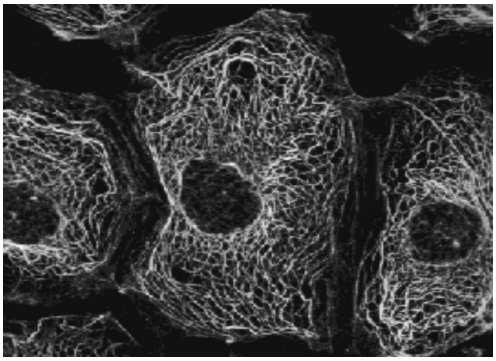
Dengan struktur sel tersebut yang terletak di sebelah dalam sel, dapat menyediakan luas permukaan yang memadai sesuai dengan volumenya yang besar yaitu bahwa antara kompartemen-kompartemen terbungkus membran di dalam sel dan lingkungan di luar sel terjadi suatu mekanisme pertukaran (transpor) yang tiada henti. Mekanisme tersebut adalah endositosis dan eksositosis, yang hanya terjadi pada sel-sel eukariotik.

Dalam endositosis, bagian-bagian pada membran sebelah luar membentuk lekukan ke arah dalam yang kemudian membulat dan memisahkan diri menjadi gelembung-gelembung sitoplasma yang terbungkus membran dan berisi zat-zat yang berasal dari luar sel serta molekul-molekul yang telah terserap sebelumnya pada permukaan sel.

Eksositosis adalah proses kebalikan dari endositosis. Dalam hal ini, gelembung terbungkus membran dalam sel, mengacu dengan membran plasma dan melepaskan isinya ke lingkungan sebelah luar. Dengan cara itu, membran-

membran di sekeliling kompartemen yang terletak jauh di dalam sel berfungsi menambah luas permukaan efektif sel untuk pertukaran bahan-bahan dari luar.

5. Sitoskeleton (*Cytoskeleton*)



Sumber: Cytoskeleton (www.sinauer.com).

Gambar 1.14
Sitoskeleton

Semua sel eukariotik dilengkapi dengan sebuah kerangka sel (sitoskeleton) yang berfungsi memberinya bentuk, kemampuan bergerak, dan kemampuan mengatur organel-organel serta memindahkan organel-organel dari satu bagian sel ke bagian yang lain. Hal ini disebabkan oleh karena semakin besarnya sebuah sel, semakin rumit serta semakin khusus struktur-struktur di dalamnya.

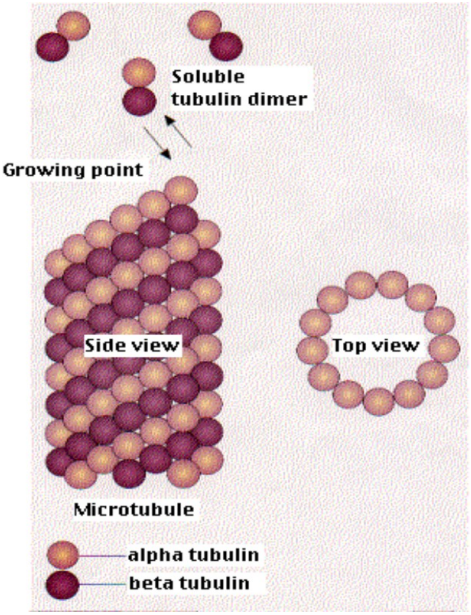
Dengan demikian, semakin besar pula keharusan untuk menjaga agar struktur-struktur tersebut tetap sebagaimana adanya dan mengatur pergerakannya.

Kerangka sel tersusun atas suatu jaringan filamen protein. Tiga di antaranya yang paling penting adalah *actin filaments* (juga disebut *microfilaments*), *intermediate filaments*, dan *microtubules*.

Mikrofilamen adalah serat tipis dengan panjang diameter 5-6 nm. Terdiri dari protein yang disebut aktin. Banyak mikrofilamen membentuk kumpulan atau jaringan pada berbagai tempat dalam sel. Adanya hal itu digabungkan dengan gerak sel. Bila sel hewan membelah menjadi dua, misalnya, terbentuklah seberkas mikrofilamen dan memisahkan kedua sel anak itu.

Pada banyak sel, sitoplasmanya bergerak-gerak dan fenomena ini dinamakan aliran sitoplasmik. Geraknya bergantung pada adanya mikrofilamen.

Mikrofilamen ini juga merupakan ciri yang penting sekali dalam sel yang berpindah-pindah dan berubah-ubah bentuknya. Hal ini tidak saja berlaku bagi sel gerak bebas yang independen seperti halnya amuba, tetapi juga pada kebanyakan sel hewan selama pembentukan embrio.



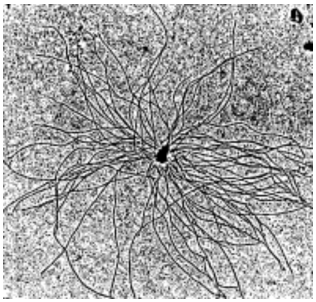
Gambar 1.15
Skema Cytoskeleton

Filamen intermediat adalah serat sitoplasmik yang panjang dengan diameter sekitar 10 nm. Disebut intermediat karena diameternya lebih besar dari diameter mikrofilamen (6 nm) dan lebih kecil daripada diameter mikrotubula (25 nm) dan filamen 'tebal' (15 nm) pada serat otot rangka. Filamen intermediet terdiri dari molekul-molekul protein fibrosa. Filamen intermedia merupakan benang berongga yang terdiri dari lima buah protofilamen, sejajar satu dengan yang lain dan membentuk sebuah lingkaran. Filamen intermediet banyak dijumpai dalam sel yang sering mendapatkan tekanan mekanis, seperti sel epitelum, akson sel saraf atau sel-sel otot polos.

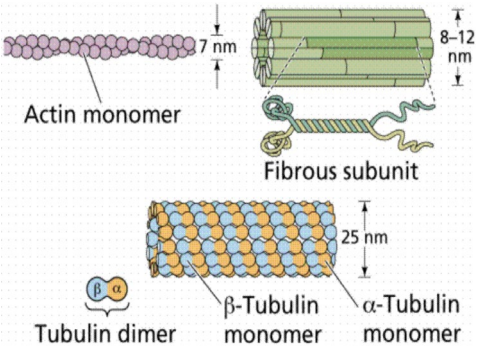
Mikrotubula adalah silinder protein yang terdapat pada kebanyakan sel hewan dan tumbuhan. Ada dua macam α-tubulin dan β-tubulin. Masing-

masing dengan berat molekul sekitar 55.000 dalton. Mikrotubula juga memainkan peranan yang amat penting dalam pembelahan sel. Pembelahan sel yang berhasil memerlukan distribusi tepat kromosomnya ke setiap sel anak. Setiap kromosom bergerak ke tujuannya berakhir pada seikat mikrotubula. Mikrotubula juga digunakan dalam pembentukan sentriol, benda basal dan flagella.

Terdapat dua kelompok mikrotubula: 1) Mikrotubula stabil yaitu mikrotubula yang dapat diawetkan dengan larutan fiksatif apa pun, misalnya: OsO_4, $KMnO_4$, atau aldehida pada suhu berapa pun. 2) Mikrotubula labil yaitu mikrotubula yang dapat diawetkan hanya dengan larutan Gambar 1.15. Mikrotubula fiksatif aldehida dan pada sekitar suhu 4°C.



Gambar 1.16a
Mikrotubula



Gambar 1.16b
Bagian-bagian Mikrotubula

Tabel 1.2
Perbandingan antara Sifat Mikrotubula, Mikrofilamen, dan Filamen Intermedia

Sifat/Tanda	Mikrotubula	Filamen intermedia	Mikrofilamen
Struktur	Berongga dengan dinding terdiri dari 13 protofilamen.	Berongga dengan dinding terdiri dari 4-5 rotofilamen.	Mampat (padat) terdiri dari polimer aktin (Aktin-F) .
Garis tengah (nm).	24	10	7
Kesatuan monomer.	Tubulin α dan β	5 jenis protein	Aktin-G
Aktivitas ATP-ase.	Terletak di dynein	----	---
Fungsi	Kemampuan pergerakan pada	Menggabungkan kesatuan kontraktif	Berperan dalam kontraksi otot

Sifat/Tanda	Mikrotubula	Filamen intermedia	Mikrofilamen
	eukariota. Gerakan kromosoma. Gerakan materi intra sel Memelihara bentuk sel.	di dalam sel otot.	perubahan bentuk sel protoplasma sitokenesis .

LATIHAN

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

1) Jelaskanlah empat bagian utama dari sel prokariotik dengan struktur dan fungsi masing-masing!
2) Jelaskanlah secara singkat perbedaan antara sel hewan dan sel tumbuhan!
3) Jelaskan bagaimana mekanisme transpor pada sel-sel eukariotik!
4) Jelaskanlah secara singkat bagaimana fungsi dari badan golgi (*golgi apparatus*) dalam sel!
5) Jelaskan secara singkat perbedaan antara Mikrotubula stabil dan Mikrotubula labil!

Petunjuk Jawaban Latihan

Apabila Anda mengalami kesulitan dalam menjawab soal-soal di atas perhatikanlah jawaban di bawah ini sebagai acuan.

1) Pada umumnya, sel prokariotik memiliki empat bagian pokok dengan struktur dan fungsi masing-masing bagian sebagai berikut: (a) dinding sel, yang terdiri dari bermacam-macam bahan organik, seperti selulosa, hemiselulosa, dan kitin, fungsinya untuk memberi bentuk tertentu pada sel, sebagai pelindung yang kuat, juga untuk mengatur keluar masuknya zat kimia ke dalam sel; (b) membran plasma merupakan pembungkus protoplasma dan sering disebut dengan *plasmalema* atau lapisan *hialin*, terdiri dari protein dan lipida. Pada tempat-tempat tertentu membran plasma ini berlipat-lipat dan membentuk suatu bangunan yang disebut *mesosoma*. Mesosoma sering disebut *kondrioid* yang berperan sebagai pengatur pembelahan dan fotosintesis bagi bakteri fotosintesis; (c) sitoplasma sering

disebut protoplasma atau plasma sel, merupakan suatu koloid yang banyak mengandung karbohidrat, protein, enzim, belerang, kalsium karbonat dan volutin yang banyak mengandung asam *ribonukleat* (ARN) dan mudah menghisap warna yang bersifat basa; (d) *flagella*, strukturnya berupa tali yang keluar dari permukaan sel, mampu bergerak untuk menggerakkan sel, alat ini berasal dari granula basal yang terdapat di sitoplasma, di tengahnya terdapat sebuah filamen yang terdiri dari senyawa protein yang disebut *flagelin*.

2) Tumbuhan dan hewan memiliki perbedaan yang sangat besar, dalam hal ini tumbuhan tidak dapat bergerak dengan aktif seperti hewan. Hal ini disebabkan karena bentuk sel tumbuhan yang kaku sehingga tidak fleksibel, berbeda dengan sel hewan yang fleksibel dan bentuknya dapat berubah-ubah. Selain dari bentuknya, perbedaan sel tumbuhan dan sel hewan juga dapat dibedakan dari hal-hal berikut:

Sel Tumbuhan	Sel Hewan
1. Sel tumbuhan lebih besar dari sel Hewan 2. Tidak memiliki lisosom 3. Tidak memiliki sentrosom 4. Memiliki dinding sel dan membran sel 5. Umumnya memiliki plastida 6. Mempunyai bentuk yang tetap 7. Memiliki vakuola ukuran besar, banyak	1. Sel Hewan lebih kecil dari sel Tumbuhan 2. Tidak memiliki plastida 3. Tidak memiliki dinding sel 4. Memiliki lisosom 5. Memiliki sentrosom 6. Mempunyai bentuk tidak tetap 7. Tidak memiliki vakuola (walaupun ada juga yang memiliki vakuola tapi ukuran kecil)

3) Mekanisme transpor tersebut pada sel-sel eukariotik adalah endositosis dan eksositosis. Dalam endositosis, bagian-bagian pada membran sebelah luar membentuk lekukan ke arah dalam yang kemudian membulat dan memisahkan diri menjadi gelembung-gelembung sitoplasma yang terbungkus membran dan berisi zat-zat yang berasal dari luar sel serta molekul-molekul yang telah terserap sebelumnya pada permukaan sel. Sedangkan eksositosis adalah proses kebalikan dari endositosis. Dalam hal ini, gelembung terbungkus membran dalam sel, menyatu dengan membran plasma dan melepaskan isinya ke lingkungan sebelah luar. Dengan cara itu, membran-membran di sekeliling kompartemen yang terletak jauh di dalam sel berfungsi menambah luas permukaan efektif sel untuk pertukaran bahan-bahan dari luar.

4) Badan golgi terlibat dalam sejumlah besar kegiatan sel antara lain perakitan protein dan lipid karbohidrat tinggi atau lebih dikenal dengan proses glikosilasi, pemulihan selaput sel, dan sekresi.
   Secara umum, fungsi dari badan golgi antara lain:
   a) membentuk dinding sel pada tumbuhan;
   b) menghasilkan lisosom;
   c) membentuk akrosom pada spermatozoa yang berisi enzim untuk memecah dinding sel telur;
   d) tempat sintesis polisakarida seperti mukus, selulosa, hemiselulosa, dan pektin (penyusun dinding sel tumbuhan);
   e) membentuk membran plasma;
   f) membentuk kantong sekresi untuk membungkus zat yang akan dikeluarkan sel, seperti protein, glikoprotein, karbohidrat, dan lemak.
5) Mikrotubula stabil, yaitu mikrotubula yang dapat diawetkan dengan larutan fiksatif apa pun, misalnya: OsO_4, $KMnO_4$, atau aldehida pada suhu berapa pun. Mikrotubula labil, yaitu mikrotubula yang dapat diawetkan hanya dengan larutan fiksatif aldehida dan pada sekitar suhu 4°C.

RANGKUMAN

Sel merupakan kesatuan struktural, fungsional, dan herediter terkecil dari makhluk hidup yang berupa ruangan kecil yang dibatasi oleh selaput dan berisi cairan pekat, sel merupakan suatu unit dasar biologi. Teori biogenesis menyatakan bahwa semua sel hidup berasal dari sel yang telah ada. Konsep tersebut populer dengan *omnis cellula e cellula*. Sel dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu sel prokariotik (*prokaryotic*) dan sel eukariotik (*eukaryotic*).

Sel prokariotik merupakan sel yang tidak memiliki membran nukleus, hal ini menyebabkan nukleus bercampur atau mengadakan hubungan langsung dengan sitoplasma. Ukuran dari sel prokariotik sangat kecil, yaitu 1−10 μm. Contoh dari sel prokariotik adalah pada mycoplasma, bakteri dan ganggang biru. Pada umumnya sel prokariotik memiliki empat bagian pokok dengan yaitu: dinding sel, membran plasma, sitoplasma, dan flagela.

Eukariotik adalah sel dengan nukleus sejati. Sel ini dibungkus oleh membran nukleus sehingga isinya tidak bercampur dengan sitoplasma. Ada dua bagian utama sel, yaitu: inti dan isinya sering kali disebut nukleoplasma, dan bagian sisanya yang disebut sitoplasma. Inti dan sitoplasma itu dikelilingi oleh membran, demikian pula bagian yang lebih kecil seperti mitokondria dan benda-benda Golgi.

TES FORMATIF 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1) Pernyataan di bawah ini yang bukan merupakan ciri dari sel tumbuhan adalah ....
   A. memiliki membran sel
   B. tidak memiliki lisosom
   C. tidak memiliki sentrosom
   D. tidak memiliki dinding sel

2) Pada semua sel, bagian yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya sintesis protein adalah ….
   A. nukleoid
   B. ribosom
   C. flagella
   D. kloroplas

3) Sel yang tidak memiliki membran nukleus, yang menyebabkan nukleus bercampur atau mengadakan hubungan langsung dengan sitoplasma, adalah ….
   A. eukariotik
   B. prokariotik
   C. mesosoma
   D. mitokondria

4) Bagian sel prokariotik yang berfungsi untuk memberi bentuk tertentu pada sel, sebagai pelindung yang kuat, juga untuk mengatur ke luar masuknya zat kimia ke dalam sel adalah ….
   A. membran plasma
   B. sitoplasma
   C. nukleus
   D. dinding sel

5) Bagian sel prokariotik yang banyak mengandung karbohidrat, protein, enzim, belerang, kalsium karbonat dan volutin yang banyak mengandung asam *ribonukleat* (ARN) dan mudah menghisap warna yang bersifat basa ….
   A. membran plasma
   B. sitoplasma

C. nukleus
D. mitokondria

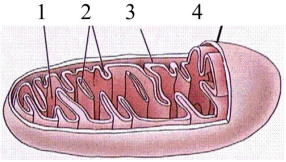
6) Bagian yang berfungsi sebagai alat gerak pada sel prokariotik adalah ….
A. membran plasma
B. *flagella*
C. sitoplasma
D. nekleus

7) Bagian sel yang terlibat dalam sejumlah besar kegiatan sel antara lain perakitan protein dan lipid karbohidrat tinggi atau lebih dikenal dengan proses glikosilasi, pemulihan selaput sel, dan sekresi adalah ….
A. sitoplasma
B. retikulum endoplasma
C. mikrotubula
D. badan golgi

8) Jaringan filamen protein yang menyusun kerangka sel adalah ….
A. *actin filaments*, *intermediate filaments*, dan *microtubules*
B. *retikulum* endoplasma, *mikrotubula*, dan sitoplasma
C. *actin filament*, *mikrotubula*, dan *intermediate filament*
D. sitoplasma, badan golgi dan ribosom

9) Organ subseluler yang berstruktur tinggi tempat terjadinya fotosintesis adalah ….
A. sitoplasma
B. badan golgi
C. ribosom
D. kloroplas

Untuk soal No. 9 dan 10. perhatikanlah Gambar di bawah ini



10) Bagian dari mitokondria yang ditunjukkan oleh angka 2 adalah ….
    A. *matrix*
    B. *cristae*
    C. *inner membrane*
    D. *outer membrane*

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

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

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

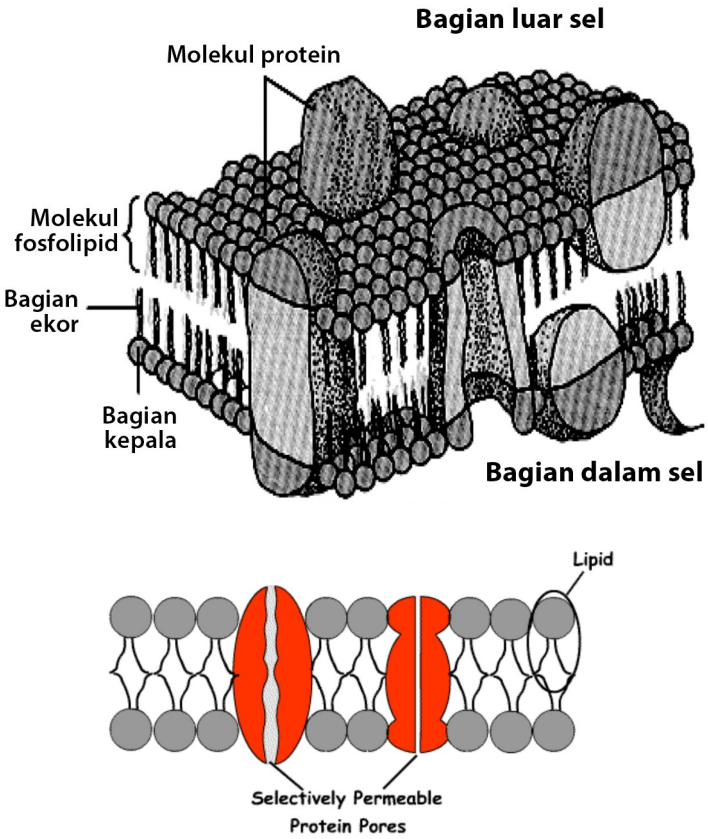
Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 2

Membran Sel

Mahasiswa super, sebagaimana telah sedikit dibahas pada Kegiatan Belajar 1, sekarang saatnya kita perdalam pemahaman kita tentang membran sel. Membran sel (bahasa Inggris: *cell membrane*, *plasma membrane*, *plasmalemma*) adalah fitur universal yang dimiliki oleh semua jenis sel berupa lapisan antarmuka yang disebut membran plasma, yang memisahkan sel dengan lingkungan di luar sel, terutama untuk melindungi inti sel dan sistem kelangsungan hidup yang bekerja di dalam sitoplasma. Membran sel berupa selaput tipis, disebut juga membran plasma (*plasmalema*). Tebal membran sel antara 5-10 nm (1nm = 1.10^{-9} m). Membran sel apabila diamati dengan mikroskop cahaya tidak terlihat jelas, tetapi keberadaannya dapat dibuktikan pada waktu sel mengalami *plasmolisis*. Membran plasma sangat tipis sehingga hanya dapat divisualisasikan dengan menggunakan mikroskop elektron. Membran plasma adalah suatu susunan berlapis dengan pola beraturan dan terutama terdiri atas protein dan lipid. Fungsi membran tidak mungkin terpisahkan dari proses kehidupan. Membran plasma merupakan suatu plasma yang membatasi sel dengan lingkungannya yang bersifat semipermeabel.

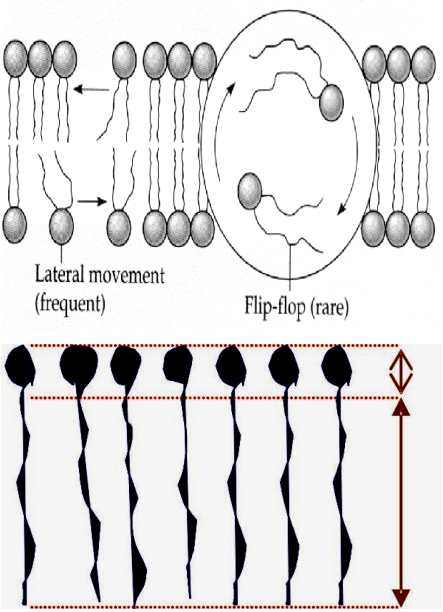
Membran sel tersusun atas molekul-molekul protein, lapisan senyawa lemak (fosfolipid), air, karbohidrat, dan sedikit kolesterol. Setiap lapisan senyawa lemak, tersusun atas gugus lipid dan fosfat. Gugus lipid dari fosfolipid bersifat tidak suka air (hidrofobik), sedangkan gugus fosfat bersifat suka air (hidrofilik). Gugus lipid sering disebut ekor dan gugus fosfat disebut kepala. Setiap fosfolipid akan saling berpasangan sehingga membentuk dua lapisan (bilayer) fosfolipid yang saling berlawanan. Reaksi-reaksi biokimia dalam metabolisme sel memerlukan bahan-bahan tertentu (misalnya nutrisi, O_2) dari luar sel, di samping itu digunakan juga untuk mengeluarkan sisa metabolisme yang tidak berguna (misalnya CO_2). Masuknya bahan-bahan ke dalam sel dan ke luarnya zat-zat tertentu dari dalam sel diatur oleh membran plasma.



Sumber: Heath Biology, 1985

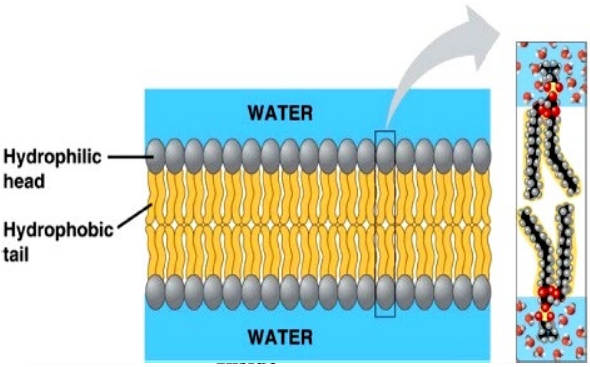
Gambar 1.17
Membran Plasma

Teori tentang membran plasma telah dikenal semenjak Overtoon menemukan bahwa membran plasma terdiri dari sederet molekul *fosfolipid* yang membentuk lapisan. *Fosfolipid* merupakan senyawa yang bersifat *hidrofilik* (pada daerah kepala yaitu gugus fosfat) dan *hidrofobik* (pada daerah ekor yaitu asam lemak). Dengan demikian, dapat berfungsi sebagai penyekat karena lapisan air di luar protoplasma tidak dapat masuk ke dalam sel.



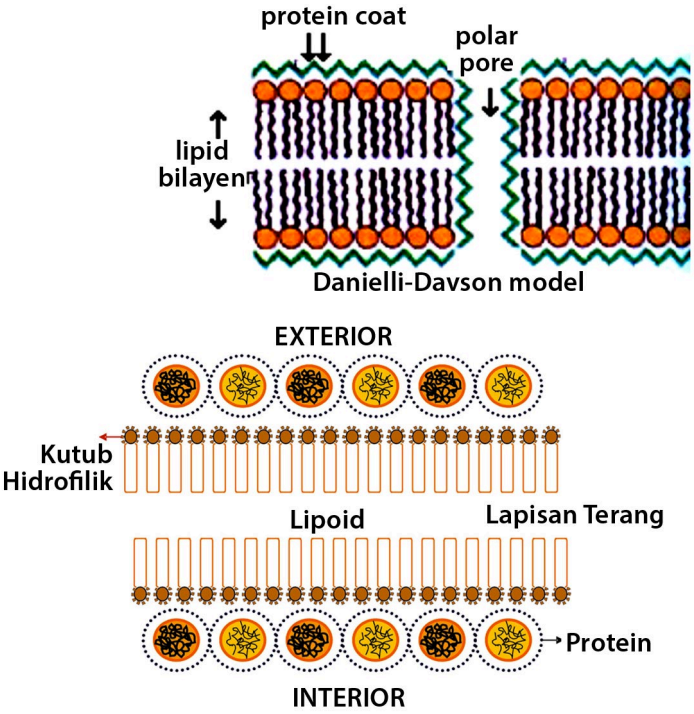
Gambar 1.18
Model Membran Plasma Overtoon

Pada tahun 1925, ketika E. Gorter dan F. Grendel menerbitkan hasil penelitiannya pada organisasi lipid dalam membran sel darah merah. Penelitian mereka diperoleh dari darah berbagai mamalia termasuk anjing, biri-biri, kelinci, babi Guinia, kambing dan manusia. Gorter dan Grendel menyimpulkan bahwa membran sel dibentuk dengan lembar lipid bimolekuler. Mereka menyatakan bahwa ujung polar dari salah satu lapisan molekul lipid menghadap ke luar (ke lingkungan plasma) dan ujung polar dari lapisan lipid yang lainnya menghadap ke dalam. Kemudian bagian nonpolar pada akhir hidropobik akan saling berhadapan satu sama lain. Model Goster dan Grendel tidak dapat menjelaskan bagaimana zat-zat yang tidak dapat larut dalam lemak dapat menembus membran.



Gambar 1.19
Model Membran Plasma Gorter & Grendel

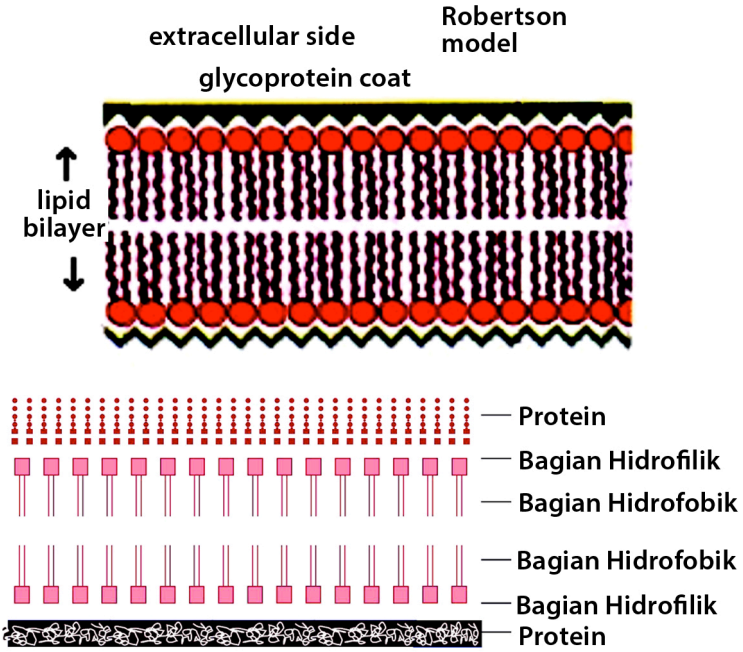
Pada tahun 1938 Davson dan Danielli mengemukakan bahwa membran plasma tersusun dari dua lapisan lipida, ujung hidrofobiknya saling berhadapan seperti susunan misel yang dapat larut dan berikatan bersama dengan interaksi hidrofobik. Sedangkan ujung yang berlawanan (kutub lainnya), menghadap ke luar, berhubungan langsung dengan lapisan monomolekul dan protein. Struktur Davson dan Danielli disebut model kue sandwich.



Sumber: Davson & Danielli

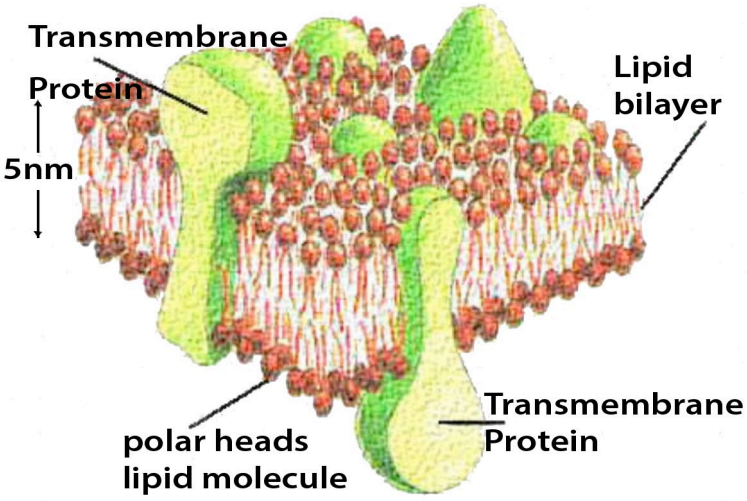
Gambar 1.20
Model Membran Plasma Kue Sandwich

Pada tahun 1957 J.D. Robertson mengemukakan bahwa membran tertentu dengan osmium tetraoksida membentuk lapisan Trilaminar yang karakteristik. Trilaminar terdiri dari dua lapisan gelap di luar yang paralel (*osmiophilic*) dan lapisan terang di bagian pusat (*osmiobhic*). Lapisan osmiophilic biasanya memiliki ukuran ketebalan 2,0 − 2,5 nm. Menurut Robertson lapisan gelap di luar yang paralel dianggap terdiri dari molekul protein dan lemak yang polar, sedangkan lapisan terang di bagian pusat terdiri dari bagian molekul lemak yang nonpolar. Belakangan, pada tahun 1965, Robertson mengubah pendapatnya. Ia menganggap bahwa lapisan luar bukan protein dan lemak yang polar tetapi mukopolisakarida dan lemak yang polar.

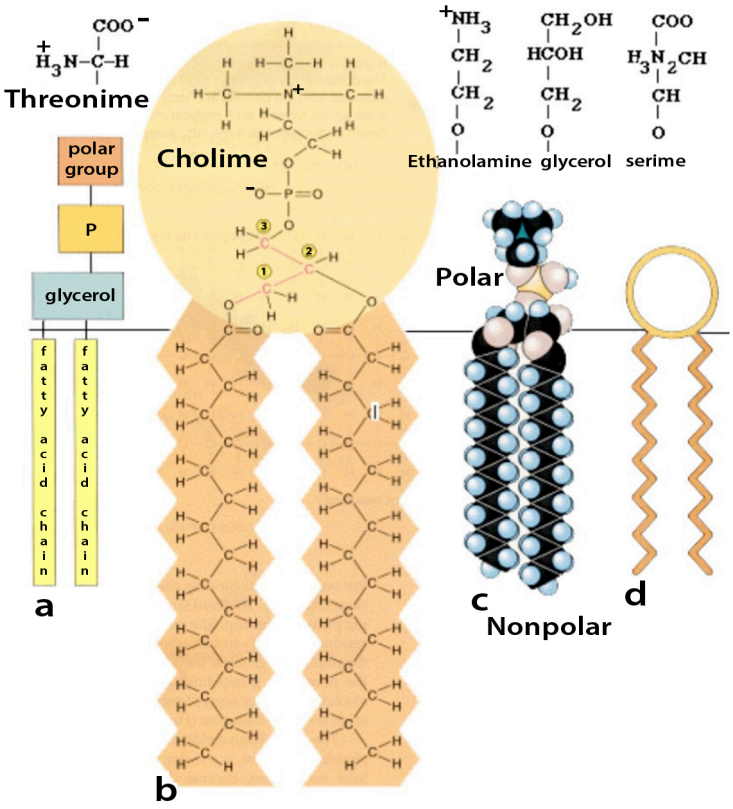


Gambar 1.21
Model Membran Plasma J. P. Robertson

S.J. Singer dan Nicolson, pada tahun 1972, mengajukan model cairan mozaik bagi plasmalemma. Model yang mereka usulkan pada dasarnya menggambarkan bahwa membran merupakan larutan dua dimensi yang terdiri atas lipid dan protein globuler yang terarah. Karakteristik model ini adalah sebagian besar dari seluruh molekul fosfolipid dan glikolipid membran tersusun sebagai dwilapis. Dwilapis ini memegang peran ganda; *pertama*, sebagai pelarut protein membran yang integral dan *kedua*, sebagai sawar membran tertentu dan mungkin diperlukan untuk aktivitasnya. Protein membran dapat bebas berdifusi lateral dalam matrik lipid, kecuali bila ada pembatasan oleh interaksi yang khusus, namun tidak bebas untuk berputar dari satu sisi membran ke sisi lainnya. Model membran mozaik cair adalah model membran yang digunakan pada saat ini karena mampu menjawab masalah lalu lintas zat yang melewati membran permeabilitas. Sebagian kecil lipid membran berinteraksi secara khas dengan protein.



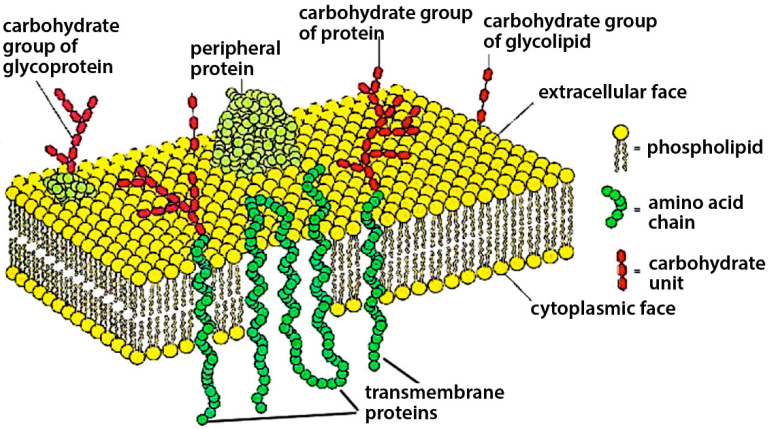
Gambar 1.22
Model Fluid Mozaik



Gambar 1.23
Molekul Lipid Dwilapis

A. STRUKTUR MEMBRAN SEL

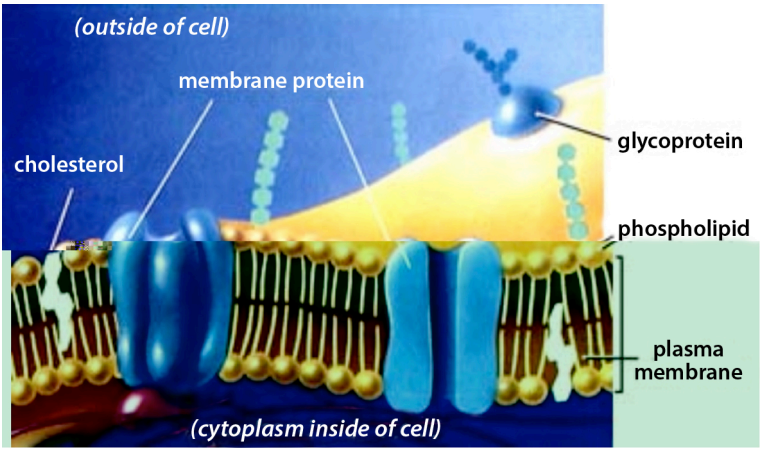
1. Komponen Penyusun Membran



Gambar 1.24
Komponen Penyusun Membran Sel

Model Fluid Mozaic dari struktur membran sangat didukung oleh bukti-bukti visual yang didapatkan sewaktu membran diteliti menggunakan mikroskop elektron. Abalisis kimiawi juga menyingkapkan bahwa membran sel tersusun atas lipid, protein, dan karbohidrat.

Tiga membran yang utama adalah fosfolipid, glikolipid, dan kolesterol. Sedangkan protein penyusun membran adalah protein intrinsik (integral) dan protein porifer (ekstrinsik). Karbohidrat penyusun membran adalah glikoprotein. Selanjutnya, akan dibahas lebih lanjut tentang komponen penyusun membran tersebut.



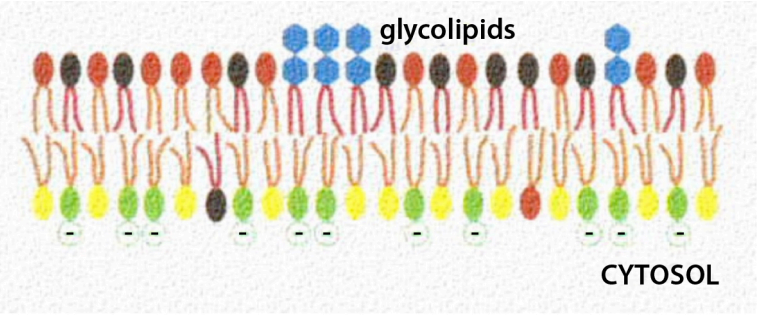
Gambar 1.25
Struktur Membran yang Membatasi Sel dengan Lingkungannya

a. Lipid membran

1) Fosfolipid
Fosfolipid merupakan ester asam lemak dengan gliserol yang mengandung asam fosfat dan nitrogen. Fosfolipid utama yang ditemukan adalah fosfogliserida, yang mengandung dua molekul asam lemak yang berkaitan ester dengan gugus hidroksil pada gliserol. Gugus hidroksi yang ketiga pada gliserol membentuk ikatan ester dengan asam fosfat. Fosfogliserida yang umum dijumpai adalah fosfatidil kolin, fosfatidil serin, fosfatidil etanolamin, fosfatidil inositol, dan difosfatidil gliserol. Rantai asam lemak dalam fosfolipid biasanya mengandung atom karbon dalam jumlah genap, khas antara 14 dan 24 yang paling umum adalah asam lemak-14 dan karbon-16. Asam lemak dapat jenuh atau tidak jenuh.

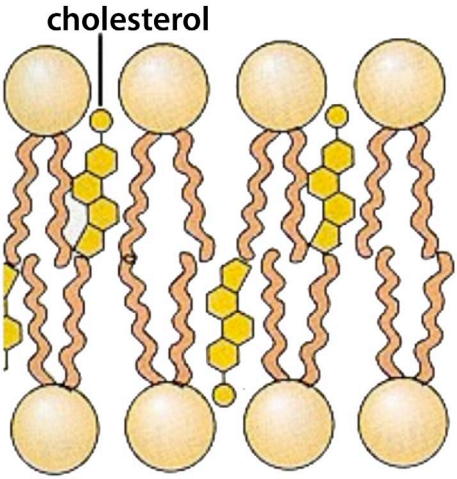
2) Glikolipid
Glikolipid sesuai namanya, merupakan lipid yang mengandung gula. Dalam sel hewan, glokolipid, seperti juga sfingomielin, diturunkan dari *sfingosin*. Gugus amino pada kerangka karbon *sfingosin* terisolasi oleh asam lemak seperti pada kerangka karbon sfingomielin. Perbedaan antara glikolipid dan sfingomielin terdapat pada jenis fragmen yang berikatan pada gugus hidroksi primer di kerangka karbon sfingosin. Pada glikolipid, satu atau lebih gula berikatan pada gugus ini. Glikolipid yang paling sederhana

adalah *serebrosida*, hanya ada satu residu gula, glukosa dan galaktosa. Glikolipid yang lebih majemuk, misalnya *gangliosida*, mengandung rantai bercabang terdiri atas sebanyak tujuh residu gula.



Gambar 1.26
Struktur Glakolipid dalam Sel

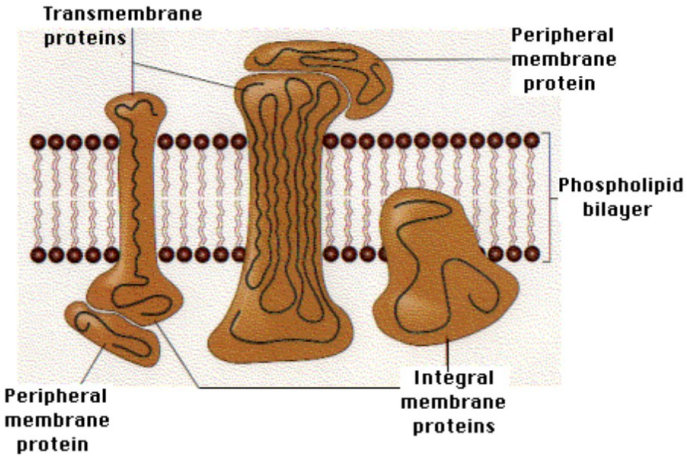
3) Kolesterol
Lipid lain yang penting dalam beberapa membran adalah kolesterol. Kolesterol dan senyawa turunan esternya, dengan asam lemaknya yang berantai panjang merupakan komponen penting dari membran sel sebelah luar.



Gambar 1.27
Kolesterol dalam Sel

b. Protein membran

1) Protein Integral (Protein Intrinsik)
Protein integral adalah protein yang merentangi lapisan lipid dwilapis. Protein membran intrinsik dan integral mengandung daerah hidrofilik dan hidrofobik. Bagian hidrofilik protein berinteraksi dengan ujung polar molekul lipid pada masing-masing permukaan selebaran bimolekuler.

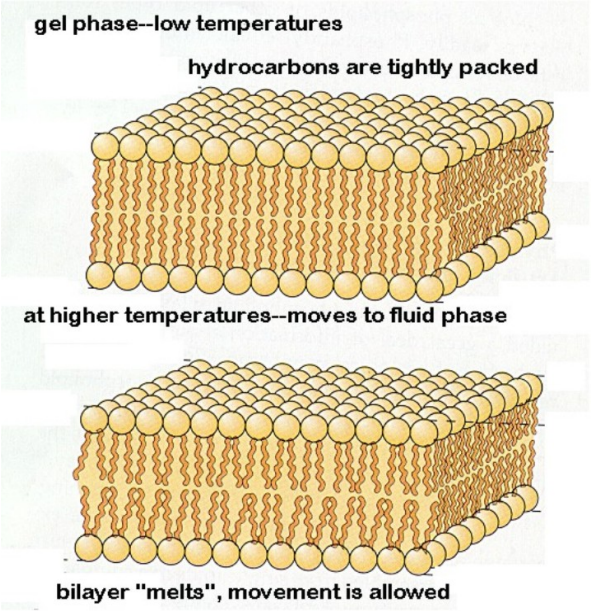


Gambar 1.28
Protein Membran Integral Berinteraksi Luas dengan Daerah Hidrokarbon Pada phospolipid dwilapis (bilayer). Hampir Semua Protein Membran Integral Yang Sudah Dikenal, Merentang Pada Dwilapis Lipid. Protein Membran Perifer Berikatan Pada Permukaan Protein Membran Integral.

2) Protein Porifer (protein ekstrinsik)
Protein membran porifer atau ekstrinsik umumnya terikat longgar pada membran protein yang kaya akan asam amino dengan rantai samping hidrofilik yang menyebabkan interaksi dengan lingkungan air dan dengan permukaan *polar lipid dwilapis*.

c. Karbohidrat membran

Bagian ini merupakan protein yang mengandung karbohidrat yang terikat secara kovalen, yang merupakan monosakarida tunggal atau oligosakarida yang relatif pendek. Kebanyakan protein yang disekresi menuju ke bagian luar sel relatif adalah glikoprotein, seperti kebanyakan protein dalam plasma darah. Salah satu protein membran sel yang paling banyak diketahui adalah glikofirin (dalam sel darah merah), yang mengandung hampir 50% karbohidrat dalam bentuk rantai polisakarida yang panjang yang terikat secara kovalen pada salah satu ujung rantai polipeptida. Rantai polisakarida memanjang dari permukaan luar membran sel sedangkan rantai polipeptida terbenam di dalam sel.



Gambar 1.29
Membran Sel

Lipida polar bersifat ampifatik yang terdiri dari senyawa-senyawa yang mempunyai gugus hidrofobik (tidak menyukai air) dan hidrofilik (menyukai air). Di dalam sistem cair, lipida polar secara spontan terdispersi, membentuk misel yaitu suatu susunan globuler yang terbentuk oleh gugus-gugus kepala polar yang dikelilingi air dan rantai-rantai hidrokarbon bergerombol berhadap-hadapan, dengan ekor hidrokarbon lipida yang tersembunyi dari lingkungan cair dan kepala hidrofilik yang bermuatan listrik terbuka pada permukaan, bersinggungan dengan medium cair.

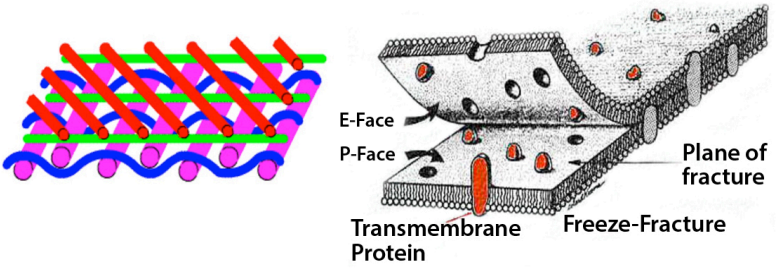
Lipida cair membentuk suatu lapisan dengan ketebalan satu molekul yaitu lapisan tunggal. Pada sistem tersebut, ekor hidrokarbon terbuka ke udara, jadi terhindar dari air, dan kepala hidrofilik memanjang ke fase cair yang bersifat polar.

Lipida polar juga segera dan dengan spontan membentuk lapisan ganda yang sangat tipis, yang memisahkan dua kompartemen cair. Pada struktur ini ekor hidrokarbon molekul lipida memanjang ke bagian dalam yang

berkesinambungan, dan kepala hidrofilik menghadap ke luar, memanjang ke fase cair. Tebal lapisan ganda fosfolipid kira-kira 6−7 nm (lihat Gambar 1.28).

2. Sifat-sifat Membran Plasma

a. Selektif permeabel



Gambar 1.30
Dwilapis Lipid dan Protein

Sifat semi permeabel ini dapat disebabkan oleh dwilapis lipid maupun proteinnya. Bagian membran hidrofobik menghalangi transpor ion dan molekul polar, yang bersifat hidrofobik seperti hidrokarbon, karbondioksida dan oksigen yang dapat larut dalam membran dan dapat melintasinya dengan mudah. Molekul sangat kecil yang polar tetapi tidak bermuatan juga dapat lewat melalui membran dengan cepat. Contohnya adalah air dan etanol, yang cukup kecil untuk lewat di antara lipid-lipid membran. Bila lapisan lipid tidak sangat permeabel terhadap molekul polar tak bermuatan yang lebih besar, seperti glukosa dan gula lainnya. Dwi lapis ini juga relatif tidak permeabel terhadap semua ion, sekalipun ion itu sangat kecil seperti H^+ dan Na^+. Atom atau molekul bermuatan dan lapisan airnya sulit menembus lapisan hidrofobik membran. Akan tetapi, dwilapis lipid hanyalah salah satu bagian cerita tentang permeabilitas relatif membran. Protein yang ada dalam membran memainkan peran penting dalam pengaturan transpor. Karena itu tidak semua zat atau molekul dari luar sel dapat masuk melalui membran plasma. Hal ini karena struktur dasar membran plasma sebagian besar terdiri atas lipid (*fosfolipid*) yang hanya dapat dilewati oleh molekul-molekul tertentu dengan perantara *protein carrier*.

b. Sifat fluiditas membran

Membran bukan lembaran molekul statis yang terikat kuat di tempatnya. Membran ditahan bersama terutama oleh interaksi hidrofobik, yang jauh lebih lemah dari ikatan kovalen. Sifat fluiditas membran ditentukan oleh faktor-faktor di bawah ini.

1) Pergerakan fosfolipid.
   Sebagian fosfolipid dapat berpindah secara acak dalam bidang membrannya. Fosfolipid bergerak untuk menjaga fluiditas membran. Fosfolipid bergerak sepanjang bidang membran dengan cepat, kira-kira 2 μm seukuran panjang sel bakteri. Pergerakan fosfolipid ini ada dua macam; pergerakan lateral (dalam dua dimensi/pada satu lapisan saja) dan pergerakan flipflop/bertukar tempat (dari lapisan luar ke dalam dan sebaliknya). Akan tetapi jarang terjadi suatu molekul bertukar tempat secara melintang melintasi membran, yang beralih dari satu lapisan fosfolipid ke lapisan yang lainnya karena untuk melakukan hal itu, sebagian hidrofilik lapisan tersebut harus melintasi inti hidrofobik membrannya.
2) Ketidakjenuhan asam lemak.
   Suatu membran tetap berwujud fluida begitu suhu turun, hingga akhirnya, pada beberapa suhu kritis, fosfolipid mengendap pada suatu susunan yang rapat yang membrannya membeku. Membran tetap berwujud fluida pada suhu yang lebih rendah jika membran itu mengandung banyak fosfolipid dengan ekor hidrokarbon tak jenuh. Hal ini disebabkan oleh adanya kekusutan di tempat ikatan rangkapnya. Dengan kata lain adanya ikatan rangkap dapat menyulitkan letak rantai-rantai karbon agar tersusun padat sehingga dapat menghambat proses pembekuan membran pada saat suhu rendah. Lebih besar jumlah ikatan rangkap pada hidrokarbon fosfolipid maka membran akan bersifat semakin cair.
   Untuk mempertahankan fluiditasnya membran sel-sel yang hidup pada suhu rendah mempunyai proporsi asam lemak yang lebih tinggi. Bukti lain mengemukakan bahwa sel dapat mengubah kesetimbangan asam lemak jenuh dan tak jenuh dalam membran menjadi suatu adaptasi terhadap pergantian suhu.
3) Adanya kolesterol.
   Kolesterol juga memegang peranan kunci sebagai pengontrol fluiditas membran. Kolesterol mengandung inti steroid dengan gugus hidroksil pada satu sisi dan ekor hidrokarbon yang lentur pada sisi yang lain. Kolesterol tersisip di antara fosfolipid dengan sumbu tegak lurus pada bidang

membran. Gugus hidroksil kolesterol membentuk ikatan hidrogen dengan atom oksigen karbonil pada gugus kepala fosfolipid. Sedangkan ekor hidrokarbon kolesterol terletak di bagian tengah dwilapis lipid yang nonpolar. Kolesterol mencegah kristalisasi rantairantai asam lemak dengan menyusup di antaranya. Pada dasarnya, konsentrasi kolesterol yang tinggi mencegah pergerakan fosfolipid. Efek kolesterol yang berlawanan inilah yang menghambat rantai asam lemak tidak melakukan pergerakan sehingga membran menjadi kurang cair. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kolesterol meredam fluiditas membran.

4) Keterikatan protein pada filamen sitoskleton
Protein ada yang terikat pada filamen sitoskleton sehingga dapat mempertahankan bentuk membran meskipun bersifat cair. Pelekatan ini berkombinasi untuk memberi kerangka luar yang lebih kuat daripada yang dapat diberikan oleh membran plasma itu sendiri.

c. Dinamis

Yang dinamis dari selaput plasma adalah molekul-molekul dari selaput plasma, yaitu fosfolipid dan protein. Fosfolipid pada suhu normal (misal 37°C pada prokaryota) akan berada dalam kondisi normal, tetapi pada suhu yang lebih tinggi fosfolipid akan menjadi mudah bergerak demikian juga bila lebih pendek asam lemaknya maka akan makin mudah bergerak.

d. Membran sebagai mosaik

Membran plasma disebut mosaik karena letak komponen (protein) yang tidak teratur. Hal ini memudahkan transportasi zat. Membran plasma dan membran berbagai macam organel masing-masing memiliki koleksi protein yang unik. Sampai saat ini telah ditemukan lebih dari 50 jenis protein dalam membran plasma yang tersusun dengan pola yang tidak teratur.

e. Asimetris

Molekul-molekul lipid penyusun lapisan bagian luar selaput plasma berbeda dengan penyusun bagian dalamnya. Demikian pula molekul-molekul peptide dan karbohidratnya. Sebagian besar karbohidrat terdiri dari glikolipid, glikoprotein, dan proteoglikan. Karbohidrat-karbohidrat ini hanya ada pada permukaan luar membran plasma, karena itu pada bagian luar susunannya lebih kompleks. Hal ini untuk mendukung fungsinya sebagai reseptor molekul-molekul khusus maupun agensia khas seperti virus dan bakteri. Selain itu juga

dapat sebagai reseptor terhadap perubahan lingkungan seperti suhu, intensitas cahaya, dan lain-lain.

3. Fungsi Membran Plasma

Membran plasma mempunyai fungsi yang sangat kompleks, membran bukan sekadar kulit ienert yang membungkus sel dan bukan pula struktur statis yang tetap karena membran menjalankan banyak fungsi dinamis yang kompleks. Membran bersama organel-organel sel lainnya menjalankan banyak fungsi yang dinamis. Berikut ini, fungsi membran secara umum.

a. Sebagai pembatas antara lingkungan di dalam sel dengan lingkungan di luar sel dan di antara lingkungan dalam organel dengan lingkungan dalam sitoplasma.
b. Mengatur permeabilitas membran terhadap senyawa-senyawa atau ion-ion yang melewatinya. Permeabilitas terutama diatur oleh protein integral.
c. Sebagai protein pengenal atau reseptor molekul-molekul khusus seperti hormon, antigen metabolisme maupun agensia khas seperti bakteri atau virus. Selain itu selaput sebagai suatu kelompok molekul juga dapat berfungsi sebagai reseptor terhadap perubahan suhu, intensitas cahaya dan lain-lain.
d. Sebagai jalan untuk keluar masuknya zat dari luar ke dalam sel atau sebaliknya. Bagian transpor ini akan dibahas lebih lanjut pada bagian berikutnya.
e. Penyedia enzim karena membran plasma berfungsi sebagai sebuah sarana terselenggaranya aktivitas seluler yang terorganisasi. Sebagai contoh, enzim sitokrom yang terlibat dalam respirasi merupakan bagian dari membran mitokondria.
f. Berperan dalam transduksi energi. Perubahan satu jenis energi ke bentuk yang lain (transduksi) merupakan hal yang penting dalam aktivitas makhluk hidup, dan membran secara langsung berhubungan dengan hal ini. Contoh pada tumbuhan di mana kemampuan sel tumbuhan untuk menangkap energi matahari dan mengubahnya dalam bentuk energi kimia yang terkandung dalam karbohidrat.

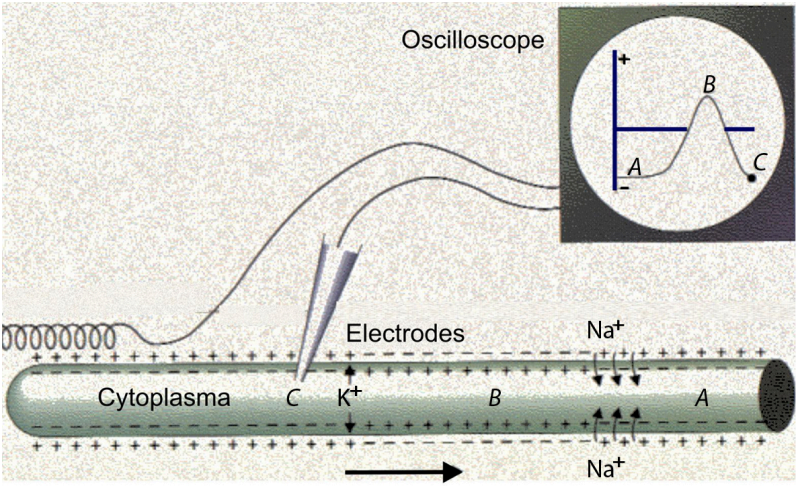
B. TRANSPOR MELALUI MEMBRAN

Transportasi melalui membran sel sangat penting bagi kelangsungan hidup sel. Substansi tertentu misalnya, harus bergerak masuk ke dalam sel untuk

menyokong agar sel itu tetap hidup, demikian juga sebaliknya. Zat-zat buangan yang dihasilkan dari metabolisme sel harus dikeluarkan dari dalam sel yang selanjutnya dibuang ke luar tubuh. Seperti sudah digambarkan sebelumnya, membran plasma berfungsi sebagai dinding atau pembatas antara zat hidup dan zat nonhidup, membran intraseluler di antara beberapa ruang sitoplasmik.

Sebagai pembatas, membran plasma mencegah terjadinya pertukaran bebas antarzat yang satu dengan yang lain, tetapi pada saat yang bersamaan membran plasma juga berfungsi sebagai sesuatu yang menyediakan sarana komunikasi di antara ruang. Setiap sel membutuhkan nutrisi, air, oksigen, ion, substrat, dan lain-lain dari lingkungannya, baik itu yang merupakan aliran darah dari suatu organisme bersel banyak atau sebuah medium di mana suatu organisme bersel satu sedang tumbuh. Merupakan tanggung jawab dari membran plasma untuk memastikan bahwa semua zat yang cocok dipersilakan masuk ke dalam sitoplasma dan sebaliknya. Dalam kapasitas ini, membran plasma biasa disebut sebagai membran selektif permeabel.

Di antara zat-zat yang diperbolehkan memasuki ruang dalam sel, beberapa di antaranya disaring dengan hanya melalui sebuah proses difusi sebagai respons terhadap perbedaan tingkat konsentrasi di antara membran. Dalam hal ini, membran plasma bertindak sebagai sebuah pagar yang dapat menutup dan membuka. Beberapa zat yang lain dibawa melalui membran sehingga tetap terjaga tingkat konsentrasinya yang tinggi ketika berada dalam sel, membran plasma berfungsi sebagai pompa molekul. Beberapa zat yang lainnya termasuk cairan di mana zat tersebut berada, dapat dipersilakan masuk ke dalam sel oleh formasi vesikel dari membran plasma. Salah satu konsekuensi terpenting dari kedudukan membran plasma sebagai sebuah membran selektif permeabel adalah kapasitasnya untuk memisahkan ion-ion yang ada dan karenanya menimbulkan adanya perbedaan potensial listrik di antara bagian-bagiannya. Perbedaan potensial listrik ini merupakan sesuatu yang berbahaya untuk sesuatu yang dikenal sebagai sel pengganggu, neuron dan sel tubuh, tetapi pada saat bersamaan juga memainkan peranan penting dalam hal kemampuan setiap sel untuk merespons lingkungannya.



Gambar 1.31
Impuls pada Sel Neuron. Perbedaan Potensial Antarbagian pada Neuron Menyebabkan Terjadinya Mekanisme Transpor ion (K^+ serta Na^+)

Pengaturan terhadap zat-zat tersebut tidak hanya terbatas pada pergerakannya dari luar ke dalam sel oleh membran plasma. Berbagai sekat intraseluler juga harus berhubungan satu sama lainnya. Tidak ada organel yang independen, masing-masing bergantung pada pertukaran zat pada kedua arah di antara membran di mana mereka terikat. Secara umum, terdapat dua macam proses transpor melalui membran sel, yaitu *transpor pasif* dan *transpor aktif*.

1. Transpor Pasif

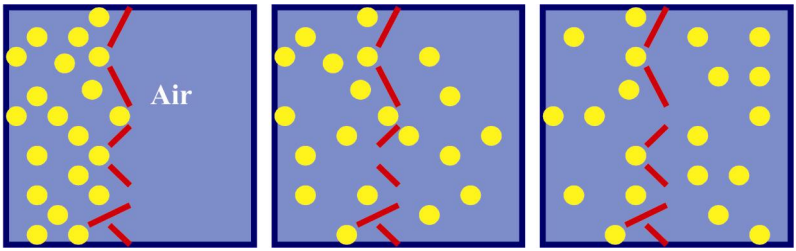
Transpor pasif yaitu gerakan sederhana suatu zat dengan perbedaan konsentrasi di dalam dan di luar sel. Jika konsentrasi di luar sel lebih tinggi, maka terjadi gerakan molekul dari luar menuju ke dalam, sebaliknya jika konsentrasi di dalam sel lebih tinggi, gerakan molekul dari sel kelingkungan. Perbedaan konsentrasi sel dengan lingkungannya disebut *gradien konsentrasi*. Transpor pasif dalam responsnya terhadap gradien konsentrasi tidak memerlukan energi. Beberapa proses yang berlangsung yang menunjukkan transpor pasif adalah:

a. Difusi

Difusi adalah perpindahan substansi tertentu dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Zat berdifusi menurut kemiringan (gradien)

konsentrasi, dan untuk ini tidak memerlukan energi (ATP). Difusi dapat dibedakan menjadi difusi sederhana dan difusi dipermudah (sering juga disebut difusi bersyarat atau difusi berfasilitas).

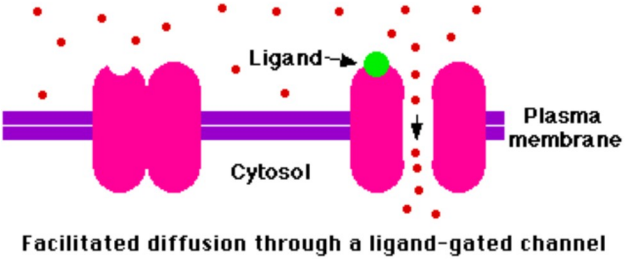
1) Difusi sederhana/bebas.
   Pada difusi sederhana molekul bergerak searah dengan gradien konsentrasi. Pada difusi bebas, zat berdifusi langsung atau bebas tanpa memerlukan *protein carrier* (pembawa). Pada umumnya metabolit yang dapat melintasi membran melalui difusi sederhana ini merupakan metabolit dengan berat molekul yang kecil, seperti; air, O_2, ethanol, CO_2, senyawa-senyawa lemak dan molekul-molekul kecil lain yang polar tak bermuatan dapat menembus secara langsung pada sela-sela lipid. Selain itu juga protein juga punya saluran di tengahnya.
   Mekanisme difusi bebas, yaitu, molekul yang dilarutkan bersifat tetap, bergerak, dan bertabrakan berulang kali setiap detik. Tabrakan molekul terjadi secara acak. Akhirnya, pergerakan secara acak tersebut membawa beberapa molekul ke daerah yang berbeda sehingga tidak ada perubahan pada konsentrasi antara dua wilayah. Perbedaan derajat konsentrasi antara sisi luar dan dalam membran akan hilang pada saat difusi telah selesai. Difusi secara bebas dan sederhana ini bukan merupakan mekanisme transpor yang terlalu penting pada membran karena berjalan lambat.



Gambar 1.32
Difusi Sederhana

2) Difusi Bersyarat/Berfasilitas
   Pada prinsipnya difusi berfasilitas sama dengan difusi bebas, yaitu dalam hal diperlukan adanya perbedaan konsentrasi dan dalam prosesnya tidak memerlukan energi. Sedangkan perbedaannya adalah pada proses difusi di mana gerakan senyawa melewati membran jauh lebih cepat karena adanya protein carrier pada membran. Pada difusi berfasilitas, difusi juga

dipengaruhi kejenuhan protein carrier terhadap zat itu. Protein carrier mengangkut senyawa-senyawa yang tidak bisa melewati lapisan lipid secara langsung, misalnya ion-ion dan senyawa lain yang polar bermuatan. Bilayer lipid sangat tidak permeabel terhadap semua ion sekalipun ion kecil seperti H^+ dan Na^+ sehingga pengangkutan harus melalui protein carrier.

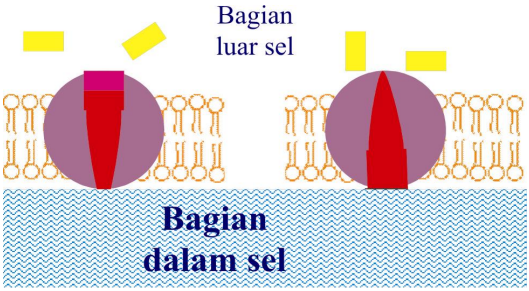


Sumber: www. Cellsbioxom

Gambar 1.33
Difusi Berfasilitas Melalui Membrane

Tahapan-tahapan dalam difusi berfasilitas adalah:

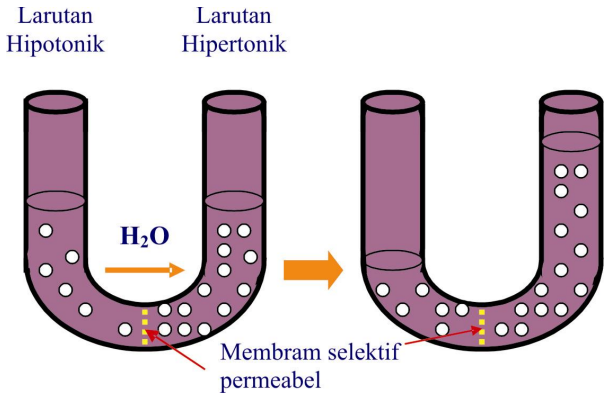
a) Tahap awal
   Yaitu tahap pengenalan (*recognition*) dari molekul metabolit yang akan mengalami transpor ke dalam sel dengan protein carrier.
b) Tahap pengikatan
   Molekul carrier yang terdapat di dalam membran akan membentuk kompleks spesifik dengan metabolit yang berada di luar membran.
c) Tahap gerakan
   Yaitu gerakan dari kompleks tersebut ke bagian yang lebih dalam dari membran. Cara geraknya dapat melalui mekanisme difusi, rotasi, osilasi dan gerakan lainnya.
d) Tahap pelepasan
   Pada tahap ini terjadi pelepasan metabolit ke dalam sel melalui mekanisme asosiasi, disosiasi, dan translokasi.



Gambar 1.34
Proses Difusi Berfasilitas

b. Osmosis

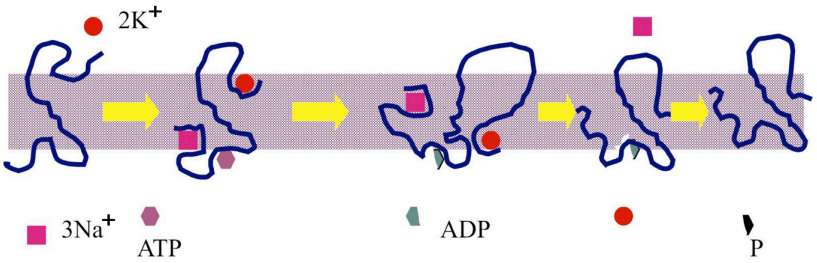
Osmosis adalah proses keluar masuknya air melalui membran plasma yang bersifat selektif permeabel. Air tersebut bergerak dari larutan yang konsentrasinya rendah menuju ke larutan yang konsentrasinya tinggi. Air dapat melewati membran secara langsung, tetapi glukosa tidak dapat menembus membran semipermeabel. Dengan waktu tertentu air akan bergerak menuju larutan glukosa, untuk meningkatkan konsentrasi larutan di sebelahnya. Jadi, di sini pergerakan molekul air menuju glukosa. Hasilnya air akan bergerak melalui membran sebagai respons terhadap gradien konsentrasi. Osmosis akan berhenti apabila sudah terjadi keseimbangan konsentrasi di dalam dan di luar sel (adanya ekivalensi) karena adanya kekuatan lain yang menahan, yakni gaya reaksi dari membran. Bila kekuatan membran lebih lemah dari kekuatan masuknya air di dalam sel maka sel akan pecah (*lysis*).



Gambar 1.35
Dua Larutan Gula Yang Berbeda Konsentrasinya Dipisahkan Oleh Membran Berpori Yang Permeabel Terhadap Pelarut (Air) Tetapi Tidak Terhadap Zat Terlarutnya (Gula). Air Berdifusi dari Larutan Hipotonik ke Larutan Hipertonik. Transpor Pasif Air, atau Osmosis, Mengurangi Perbedaan Konsentrasi Gula

2. Transpor Aktif

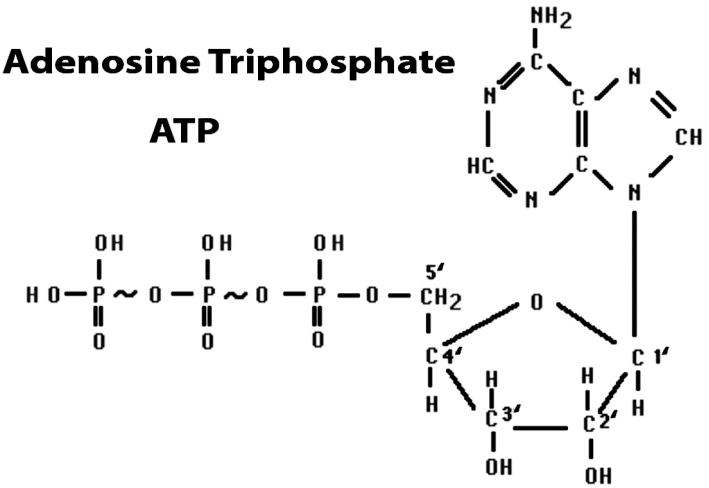
Transpor aktif merupakan pergerakan senyawa menembus membran dari daerah berkonsentrasi rendah ke daerah berkonsentrasi tinggi (melawan gradien konsentrasi). Pada transpor aktif diperlukan energi terutama bersumber pada *Adenosine Triphosphate* (ATP). Salah satu contoh transpor aktif adalah pemompaan ion Na^+ dan K^+.



Gambar 1.36a
Transpor Aktif ATP dan ADP

Konsentrasi ion K^+ dalam sel dipertahankan untuk selalu lebih tinggi daripada ai luar sel. Sebaliknya konsentrasi ion Na^+ di dalam sel diusahakan

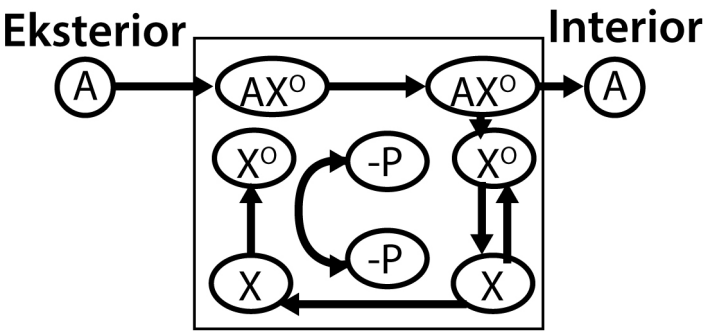
selalu lebih rendah daripada di luar sel. Ion Na^+ dan K^+ dua-duanya dipompa melawan gradien konsentrasi, dan pemompaan dapat terjadi akibat hidrolisis ATP.



Gambar 1.36b
Ikatan ATP

Mekanisme transpor aktif melalui dua tahapan, yaitu:

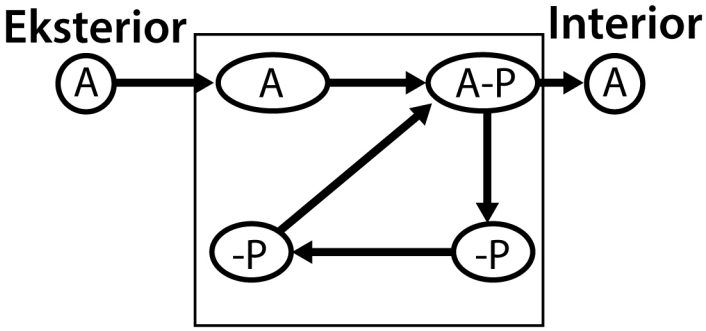
a. Proses perubahan carrier X menjadi X^o dengan menggunakan sistem energi. X tersebut selanjutnya mampu mengikat metabolit menjadi X^o. Kompleks ini bergerak menuju ke bagian yang lebih dalam. Karena adanya perubahan lingkungan yang mempengaruhi terjadinya disosiasi cepat dan A terlepas masuk ke dalam sel, dan secara spontan X^o berubah menjadi X.



Sumber: Conn & Stumpf, 1972:136

Gambar 1.37a
Cara Pertama Transpor Aktif

b. Serupa dengan mekanisme pertama, bedanya A mengalami perubahan kimia, misalnya terjadi peristiwa fosforilasi, tetapi segera diubah kembali menjadi struktur semula pada saat dilepaskan ke dalam sel.



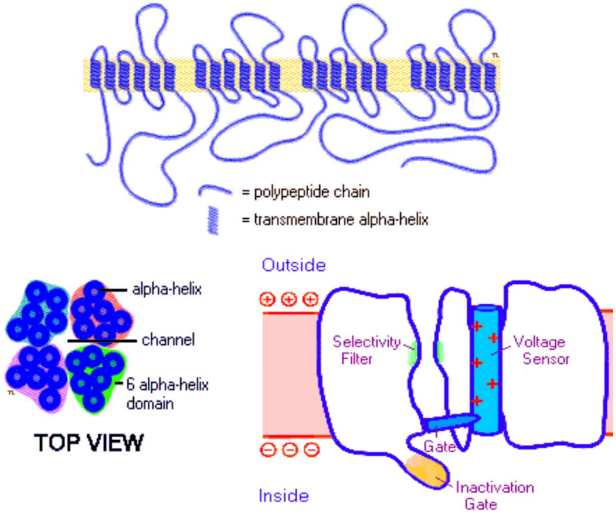
Sumber: Conn & Stumpf, 1972:136

Gambar 1.37b
Cara Kedua Transpor Aktif

Berikut ini, beberapa contoh sistem transpor aktif.

a. Pengambilan asam amino, peptide, nukleosida, dan kalium pada bakteri Escherchia coli. Bahan tersebut baru dapat masuk ke dalam selnya jika ada pengangkut dan energi yang cukup.

b. Ganggang laut dapat menimbun yodium dalam selnya melebihi konsentrasi dalam air laut di sekitarnya.
c. Pompa ion natrium dan kalium.



Gambar 1.37c
Pompa Ion Natrium dan Kalium

3. Cytosis

Cytosis adalah transpor yang melibatkan membran pecah (*lysis*). Proses ini melibatkan lisosom, berarti zat dicerna dan ditransfer dalam vesikula. Proses pengambilan substansi oleh sebuah sel dari sekitar melalui membran plasma secara umum dinamakan endositosis (*endocytosis*) dan pengeluarannya dinamakan eksositosis (*exocyitosis*). Hal yang perlu diperhatikan dalam proses ini, yaitu substansi yang dimasukkan atau dikeluarkan berada dalam vesikel, terpisah jauh dari makromolekul lain yang terlarut dalam sitosol.

a. Endositosis

Endiositosis merupakan proses pengambilan suatu substansi oleh sebuah sel dari sekitarnya melalui membran plasma secara umum. Berikut ini, beberapa bentuk endositosis.

1) Fagositosis

Fagositosis (bahasa Yunani; *phagein* = makanan) adalah proses pengambilan partikel-partikel padat yang ukurannya agak besar, misalnya

bakteri atau fragmen-fragmen sel yang rusak. Pada amoeba, proses diawali dengan pembentukan pseudopodia dari selnya yang kemudian mengelilingi makannya. Setelah itu membran plasmanya robek sementara untuk membentuk vakuola makanan, selanjutnya dinding vakuola bersatu dengan membran lisosom yang mengandung enzim hidrolitik sehingga makannya dapat dicerna. Makanan yang tercerna diserap dalam sitoplasma sedang ampas yang tidak berguna dikeluarkan dari sel dengan proses eksositosis.

2) Pinositosis

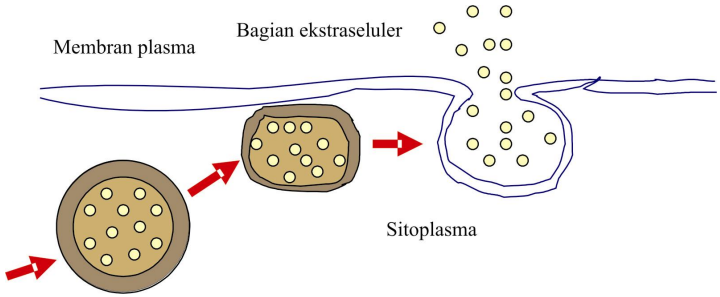
Pinositosis (bahasa Yunani; *pinein* = minum) adalah proses pengambilan makanan yang berbentuk cair dari sekitarnya yaitu partikel-partikel yang sangat kecil yang larut dalam cairan itu. Membran plasma mengadakan invaginasi, membentuk saluran panjang yang sempit dan pada ujungnya terbentuk vakuola. Vakuola tersebut lama-kelamaan melepaskan diri sehingga isinya dapat diserap oleh sitoplasma. Air dan karbohidrat tidak mampu merangsang terjadinya pinositosis.

3) Endositosis dengan perantara reseptor

Beberapa partikel, misalnya protein dan lipoprotein diambil oleh sel secara selektif dengan lebih dahulu melekat pada reseptor protein yang terdapat pada membran plasma dan selanjutnya membran plasma mengadakan invaginasi bersama-sama dengan reseptor yang mengikat partikel yang diperlukan. Partikel lipoprotein yang diambil oleh sel mengandung kolesterol dan lemak untuk kepentingan membran.

b. Eksositosis

Dalam proses eksositosis, membran suatu vesikel atau vakuola yang terdapat dalam sitoplasma mula-mula menempel pada membran plasma. Kemudian membran plasma membuka untuk sementara sehingga isi vesikel atau vakuola tersebut dapat dikeluarkan dari dalam sel. Substansi yang dikeluarkan antara lain berupa sekresi (misalnya hormon) atau partikel yang tidak tecerna.



Gambar 1.38
Proses Eksositosis

4. Translokasi Kelompok

Merupakan mekanisme transporasi gula melintasi membran pada bakteri. Berdasarkan mekanisme ini gula dilepaskan ke dalam sel dalam bentuk *phosphorilated derivate*. Mekanisme ini memerlukan transpor aktif, sehingga gula-fosfat tidak dapat lolos kembali melewati membran. Mekanisme ini meliputi reaksi:

$$\text{Posfeonol piruvat} + \text{HPr} \xrightarrow{\text{Enz I, Mg2+}} \text{Piruvat} + \text{P} - \text{H}$$

$$\text{P} - \text{HPr} + \text{Gula} \xrightarrow{\text{Enz II}} \text{Gula} - \text{GP} + \text{HPr}$$

C. PERSAMAAN NERNST DAN GOLDMAN

Selanjutnya kita menganalisis gerakan partikel bermuatan yang ada pada membran. Meskipun ion-ion utamanya bergerak melalui lubang atau rongga, tetapi kita akan melihat difusi ion ke dalam wilayah homogen, untuk mengetahui bagaimana respons flux ion terhadap konsentrasi larutan dan terhadap potensial listrik yang ada pada membran.

Molekular definisi → Feklirlan

Flux dari concentrasi tinggi ke rendah

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x}$$

C = concentrasi
x = jarak
D = larutan difusi

1. Electro difusi

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x} - UZC.\frac{\partial \sqrt{}}{\partial x}$$

U = mobilitas partikel
Z = muatan

2. Status Einstein

$$D = U\frac{RT}{F}$$

R = yang contant
F = Faraday contant

$$J = -U\left(\frac{RT}{F}\frac{\partial C}{\partial x} + ZC\frac{\partial U}{\partial x}\right) \rightarrow \text{ Hermst plank egration}$$

3. Ketika flux = nol

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{RT}{F}.\frac{\partial C}{C\partial x} \equiv -\frac{RT}{ZF}\frac{\partial xC}{\partial x}$$

4. Dari integral persamaan tersebut

$$V_1 - V_2 \equiv \frac{RT}{ZF} lu\left(\frac{C_2}{C_1}\right) \rightarrow \text{ Nerust eguilibrium eguation}$$

$C_1 =$ concentrasi di dalam sel

$C_2 =$ concentrasi di luar sel

Harus membrane eguililum potensial $(V_1 - V_2)$

Untuk beberapa ion (penurunan Goldman Eguation)

$$J = -U\left(\frac{RT}{F}\frac{\partial C}{\partial x} + ZC\frac{\partial U}{\partial x}\right)\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_1 - V_2}{d} = \frac{Vm}{d}$$

$$J = -U\frac{RT}{F}\frac{\partial C}{\partial x} - u\frac{zCVm}{d}$$

atau

$$\frac{\partial C}{\frac{-JF}{URT} - \frac{zFCVm}{dRT}} = \partial x$$

mengingat

$$\int \frac{dx}{ax+b} = \frac{1}{a}\ln(ax+b) \text{ dan } \ln a - \ln b = \ln\frac{a}{b}$$

maka

$$\frac{-\cancel{d}RT}{zFVm}\ln\left(\frac{\frac{zFV_mC_1}{dRT}+\frac{JF}{uRT}}{\frac{zFV_mC_2}{dRT}+\frac{JF}{uRT}}\right)=\cancel{d}$$

$$\frac{\frac{zFV_mC_1}{dRT}+\frac{JF}{uRT}}{\frac{zFV_mC_2}{dRT}+\frac{JF}{uRT}}=\exp\left(-\frac{zFV_m}{uRT}\right)$$

maka

$$J=-\frac{uzFV_m}{d}\frac{C_1-C_2\exp\left(-\frac{zF}{RT}V_m\right)}{\Delta-\exp\left(-\frac{zF}{RT}V_m\right)}$$

Jika arus I didefinisikan sebagai J dikalikan zF maka

$$I=-\frac{uz^2F^2V_m}{d}\frac{C_1-C_2\exp\left(-\frac{zF}{RT}V_m\right)}{1-\exp\left(-\frac{zF}{RT}V_m\right)}$$

Stokes-Einstein guation

$$p=\frac{uRT}{d} \qquad p=\textit{pemabilitas}$$

$$\frac{u}{d}=\frac{P}{RT}$$

maka

$$I=\frac{P_iz_i^2F^2V_m}{RT}\frac{C_{i1}-C_{i2}\left(-\frac{z_iFV_m}{RT}\right)}{1-\exp\left(-\frac{z_iF}{RT}V_m\right)}$$

Dalam keadaan steady stage arus semua ion = 0

$$\sum C_i=0$$

$$So \sum \frac{P_i z_i^2 F^2 V_m}{RT} . \frac{C_{i1} - C_{i2}\left(-\frac{-zF}{RT} V_m\right)}{1 - \exp\left(\frac{-zF}{RT} V_m\right)} = 0$$

Jika hanya ion Na^+, k^+ dan x^- maka

$$P_k \left\{ Ck_1 - Ck_2 . \exp\left(-\frac{FV_m}{RT}\right)\right\} + P_{Na} \left\{ C_{Na1} - C_{aNa2} . \exp\left(-\frac{FV_m}{RT}\right)\right\}$$
$$+ P_{Ce} \left\{ C_{Ce2} - C_{Ce1} \exp\left(-\frac{FV_m}{RT}\right) = 0\right.$$
$$\frac{P_k C_{k1} + P_{Na} C_{Na1} + P_{Ce} C_{Ce2}}{P_k C_{k2} + P_{Na} C_{Na2} + P_{Ce} C_{Ce1}} = \exp\left(-\frac{FV_m}{RT}\right)$$

Goldman Eguation

$$V_m = V_1 - V_2 = \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{P_k C_{k2} + P_{Na} C_{Na2} + P_{Ce} C_{Ce1}}{P_k C_{k1} + P_{Na} C_{Na1} + P_{Ce} C_{Ce2}}\right)$$

Flux dari jenis muatan pada media homogen sejalan dengan persamaan berikut.

$$F = -D\nabla C + \mu qCE \qquad (1.1)$$

Di mana *E* adalah medan listrik, yang dinyatakan dengan $E = -\nabla V$, dengan *V* adalah energi potensial listrik, μ mobilitas dan *q* muatan ion. Persamaan sebelah kanan adalah hukum distribusi Fick dan persamaan kedua adalah bentuk hukum Ohm untuk gerakan pembawa muatan pada medium yang kental Koefisien difusi untuk ion jenis *i* bisa dihubungkan dengan mobilitasnya dengan menggunakan hubungan Stokes-Einstein dimana $D = \mu_i k_B T$, sehingga persamaan (1.1) untuk geometri satu dimensi menjadi,

$$F_i = -\mu_i \left(k_B T \frac{\partial C_i}{\partial x} + q_i C_i \frac{\partial V}{\partial x} \right) \qquad (1.2)$$

Jika dicapai keadaan yang tetap, maka fluksnya akan bernilai konstan terhadap waktu. Sekarang mari kita lihat membran selektif, yang hanya bisa ditembus (permeabel) oleh ion jenis tunggal, katakanlah K^+. Persamaan (1.1)

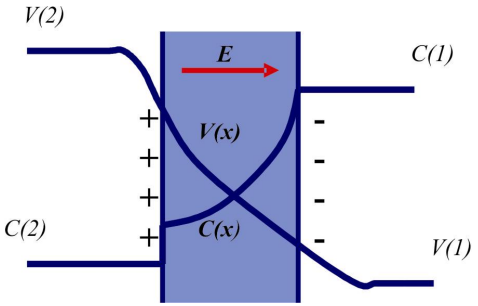
bisa dikalikan dengan faktor penggabungan eksponen (q_iV/k_BT) dan bisa digabungkan untuk menghasilkan fluk ion tunggal sebagai fungsi dari konsentrasi energi yang menabrak membran.

$$Fi = -\mu_i k_B T \frac{\int_1^2 d\left(e^{V/V_0}\right)}{\int_1^2 e^{V/V_0} dx} = \mu_i k_B T \frac{C_i(1)e^{V/V_0} - C_i(2)e^{V_2/V_o}}{\int_1^2 e^{V/V_0} dx} \quad (1.3)$$

Di mana Vo dinyatakan di sini dengan $V_o = k_BT/q_i$. Untuk mendapatkan solusi yang lebih eksplisit, memerlukan pengetahuan tentang profil potensi aktual untuk mengevaluasi integral pada denominator. Untuk membran yang sangat tipis, kita bisa mempertanyakan atau mengatakan bahwa medan yang ada pada membran sangat konstan (lihat Gambar 1.38), sehingga potensi atau energinya bisa seragam sesuai dengan jaraknya. Dalam hal ini, jika kita menyatakan $\Delta V = V_2 - V_1$, maka persamaannya akan menjadi sebagai berikut.

$$J_i = q_i F_i = \frac{\mu_i q_i^2 \ \Delta V C_i(2)\ e^{V/V_0} - \ C_i(1)}{d\ \ e^{\Delta V/V_0} - 1} \quad (1.4)$$

Persamaan (1.4) dikenal sebagai pendekatan medan-konstan (*constant-field approxi-mation*) untuk hubungan *tegangan-arus transmembran*.



Gambar 1.39
Potensial Listrik Melalui Membran Tipis

Apa yang terjadi jika flux ion bernilai nol? Karena arus ion mengalir melalui membran, maka ketidakseimbangan muatan bisa saja terjadi. Bentukan muatan ini akan membentuk medan listrik yang berlawanan dengan aliran difusi ion. Pada keadaan seimbang, jika flux bernilai nol, akan ada energi yang masuk ke dalam membran. Dengan $F = 0$ pada persamaan (1.4), kita menemukan bahwa, dengan menggunakan $C_i(1)/C_i(2)$, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$V_1 - V_2 = -(k_B T/q) \ln(C_1/C_2) \qquad (1.5)$$

Selanjutnya kita akan melihat pada beberapa membran yang bisa ditembus oleh beberapa jenis ion monovalen, yang masing-masing dicirikan dengan adanya mobilitas μ_i. Jika ion-ion ini bergerak bebas, maka total arus transmembrannya adalah jumlah dari elemen-elemen yang ada pada persamaan (1.5), yaitu

$$J = -\frac{Vq^2}{k_B T}\left[\sum_i \frac{P_i^+\left(\left(C_i^+\right)_1 - \left(C_i^+\right)_2 e^{V/V_0}\right)}{1-e^{-V/V_0}} + \sum_i \frac{P_i^-\left(\left(C_i^-\right)_1 - \left(C_i^-\right)_2 e^{-V/V_0}\right)}{1-e^{-V/V_0}}\right] a \qquad (1.6)$$

Untuk menghasilkan persamaan (1.5) dan (1.6), kita sudah menghubungkan permeabilitas instrinsik ion P_i; dengan mobilitas μi oleh persamaan $P_i = D/d = \mu_i k_B T/d$, di mana d adalah ketebalan membran. Maka A dan B dinyatakan sebagai berikut.

$$A = \sum_i P_i^+\left(C_i^+\right)_1 + \sum_i P_i^-\left(C_i^-\right)_2 \quad B = \sum_i P_i^+\left(C_i^+\right)_2 + \sum_i P_i^-\left(C_i^-\right)_1 \qquad (1.7)$$

untuk keadaan tetap $J = 0$, kita mendapatkan

$$A - B\, e^{V/V_0} = 0 \qquad (1.8)$$

atau untuk sisa energi membran

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{\sum_i P_i^+\left(C_i^+\right)_1 + \sum_i P_i^-\left(C_i^-\right)_2}{\sum_i P_i^+\left(C_i^+\right)_2 + \sum_i P_i^-\left(C_i^-\right)_1} \qquad (1.9)$$

Persamaan (1.9) dikenal sebagai persamaan Goldman-Hodgkin-Katz, dan sering kali digunakan untuk menghitung permeabilitas relatif ion pada membran tertentu. Rumus turunannya mengasumsikan bahwa semua ion masuk ke dalam

membran dan bahwa permeabilitas relatif itu tetap; jika permeabilitasnya berubah-ubah maka hubungannya kemungkinan akan menjadi lebih rumit.

LATIHAN

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

Jelaskanlah apa gunanya membran memiliki bentuk seperti mosaik!

1) Apa yang menyebabkan membran plasma memiliki sifat selektif permeabel?
2) Jelaskan bagaimana fungsi kolesterol di dalam membran!
3) Jelaskanlah dengan singkat apa saja fungsi dari membran sel secara umum!
4) Jelaskan secara singkat perbedaan antara protein intrinsik dan protein ekstrinsik pada membran!

Petunjuk Jawaban Latihan

Apabila Anda mengalami kesulitan dalam menjawab soal-soal di atas perhatikanlah jawaban di bawah ini sebagai acuan.

1) Membran plasma disebut mosaik karena letak komponen (protein) yang tidak teratur. Hal ini memudahkan transporasi zat. Membran plasma dan membran berbagai macam organel masing-masing memiliki koleksi protein yang unik. Sampai saat ini telah ditemukan lebih dari 50 jenis protein dalam membran plasma yang tersusun dengan po-la yang tidak teratur.
2) Sifat semipermeabel dapat disebabkan oleh dwilapis lipid maupun proteinnya, bagian membran hidrofibik menghalangi transpor ion dan molekul polar. Yang bersifat hidrofibik seperti hidrokarbon, karbondioksida dan oksigen yang dapat larut dalam membran dan dapat melintasinya dengan mudah. Molekul sangat kecil yang polar tetapi tidak bermuatan juga dapat lewat melalui membran dengan cepat. Kolesterol juga memegang peranan kunci sebagai pengontrol fluiditas membran.
3) Kolesterol mencegah kristalisasi rantai-rantai asam lemak dengan menyusup di antaranya. Pada dasarnya, konsentrasi kolesterol yang tinggi mencegah pergerakan fosfo-lipid. Efek kolesterol yang berlawanan inilah yang menghambat rantai asam lemak tidak melakukan pergerakan sehingga

membran menjadi kurang cair. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kolesterol meredam fluiditas membran.

4) Fungsi membran sel antara lain: sebagai pembatas antara lingkungan di dalam sel dengan lingkungan, mengatur permeabilitas membran terhadap senyawa-senyawa atau ion-ion yang melewatinya, sebagai reseptor molekul-molekul khusus seperti hormon, antigen metabolisme, jalan untuk keluar masuknya zat dari luar ke dalam sel atau sebaliknya, penyedia enzim, dan transduksi energi.
5) Protein intrinsik adalah protein yang merentangi lapisan lipid dwilapis. Protein membran intrinsik dan integral mengandung daerah hidrofilik dan hidrofobik. Bagian hidrofilik protein berinteraksi dengan ujung polar molekul lipid pada masing-masing permukaan selebaran bimolekuler. Sedangkan protein membran porifer atau ekstrinsik umumnya terikat longgar pada membran protein yang kaya akan asam amino dengan rantai samping hidrofilik yang menyebabkan interaksi dengan lingkungan air dan dengan permukaan polar lipid dwilapis.

RANGKUMAN

Membran plasma merupakan suatu plasma yang membatasi sel dengan lingkungannya yang bersifat semipermeabel. Masuknya bahan-bahan ke dalam sel dan keluarnya zat-zat tertentu dari dalam sel diatur oleh membran plasma. Membran plasma sangat tipis sehingga hanya dapat divisualisasikan dengan menggunakan mikroskop elektron. Membran plasma adalah suatu susunan berlapis dengan pola beraturan dan terutama terdiri atas protein dan lipid. Fungsi membran tidak mungkin terpisahkan dari proses kehidupan. Membran plasma menjadikan sel bentuk yang mandiri dengan memisahkan sel dari lingkungannya.

Model membran plasma sesuai dengan perkembangannya adalah: Model Membran plasma Overtoon, Model Membran plasma Goster & Grendel, Model Membran plasma Kue Sandwich (Davson & Danielli), Model Membran plasma J. P. Robertson, Model Fluid Mozaik, dan Molekul Lipid Dwilapis.

Tiga membran yang utama adalah fosfolipid, glikolipid, dan kolesterol. Sedangkan protein penyusun membran adalah protein intrinsik (integral) dan protein porifer (ekstrinsik). Karbohidrat penyusun membran adalah glikoprotein.

Beberapa sifat membran yang sangat berguna adalah: selektif permeabel, sifat fluiditas membran, dinamis, membran sebagai mozaik, dan

asimetris. Sedangkan fungsinya antara lain: sebagai pembatas antara lingkungan di dalam sel dengan lingkungan di luar sel dan di antara lingkungan dalam organel dengan lingkungan dalam sitoplasma, mengatur permeabilitas membran terhadap senyawa-senyawa atau ion-ion yang melewatinya, sebagai protein pengenal atau reseptor molekul-molekul khusus seperti hormon, antigen metabolisme maupun agensia khas seperti bakteri atau virus sebagai jalan untuk keluar masuknya zat dari luar ke dalam sel atau sebaliknya, penyedia enzim karena membran plasma berfungsi sebagai sebuah sarana terselenggaranya aktivitas seluler yang terorganisasi, dan berperan dalam transduksi energi.

TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1) Model membran yang digunakan sampai saat ini karena mampu menjawab masalah lalu lintas zat yang melewati membran permeabilitas, adalah model membran ....
   A. Mozaik cair
   B. Kue sandwich
   C. Overtoon
   D. J. P. Robertson

2) Model cairan mozaik bagi plasmalemma, dikemukakan oleh ….
   A. Overtoon
   B. S. J. Singer dan Nicolson
   C. J. P. Robertson
   D. Goster & Grendel

3) Lipid membran yang berupa ester asam lemak dengan gliserol yang mengandung asam fosfat dan nitrogen, adalah ….
   A. glikolipid
   B. kolesterol
   C. fosfolipid
   D. hidrofobik

4) Faktor-faktor yang tidak menentukan sifat fluiditas membran adalah ….
   A. pergerakan fosfolipid
   B. ketidakjenuhan asam lemak

C. adanya kolesterol
D. tingginya konsentrasi karbohidrat

5) Gerakan sederhana suatu zat melintasi membran karena adanya perbedaan konsentrasi di dalam dan di luar sel disebut ….
A. transpor aktif
B. transpor pasif
C. endositosis
D. fagotosisi

6) Membran suatu vesikel atau vakuola yang terdapat dalam sitoplasma mula-mula menempel pada membran plasma. Kemudian membran plasma membuka untuk sementara sehingga isi vesikel atau vakuola tersebut dapat dikeluarkan dari dalam sel. Hal ini terjadi pada proses ….
A. transpor aktif
B. transpor pasif
C. endositosis
D. eksositosis

7) Transpor yang melibatkan membran pecah disebut ….
A. endositosis
B. eksositosis
C. *cytosis*
D. pinositosis

8) Persamaan yang sering kali digunakan untuk menghitung permeabilitas relatif ion pada membran tertentu, adalah persamaan ….
A. Planck-Einsteins
B. Gay Lussac
C. Archimides
D. Goldman-Hodgkin-Katz

9) Proses perpindahan substansi tertentu dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah, menurut kemiringan (*gradien*) konsentrasi, dan untuk tidak memerlukan energi (ATP), adalah ….
A. difusi
B. osmosis
C. *cytosis*
D. kinesis

10) Proses pengambilan makanan yang berbentuk cair dari sekitar sel yaitu partikel-partikel yang sangat kecil yang larut dalam cairan itu di mana membran plasma mengadakan invaginasi, membentuk saluran panjang yang sempit dan pada ujungnya terbentuk vakuola, dikenal dengan istilah ….
    A. endositosis
    B. pinositosis
    C. eksositosis
    D. *cytosis*

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

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

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

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 3. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kegiatan Belajar 3

Metabolisme dan Transformasi Energi

Mahasiswa super, setelah Anda mempelajari struktur, fungsi, dan membran sel, sekarang saatnya kita belajar lebih lanjut tentang proses yang bisa terjadi pada sel yaitu Metabolisme. Metabolisme berasal dari bahasa Yunani, *metabolismos* (perubahan) yang artinya adalah segala proses reaksi kimia yang terjadi di dalam makhluk hidup, mulai makhluk hidup bersel satu yang sangat sederhana seperti bakteri, protozoa, jamur, tumbuhan, hewan; sampai makhluk yang susunan tubuhnya kompleks seperti manusia. Di dalam proses ini, makhluk hidup mendapat, mengubah dan memakai senyawa kimia dari sekitarnya untuk mempertahankan hidupnya. Metabolisme merupakan ciri kehidupan yang terjadi (muncul) dari interaksi spesifik antara molekul-molekul di dalam lingkungan sel yang teratur dengan baik.

Secara keseluruhan, metabolisme dikaitkan dengan pengaturan sumber daya materi dan energi dari sel. Proses metabolisme yang terjadi melalui proses pembebasan energi dengan cara merombak molekul-molekul kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana disebut katabolisme (respirasi seluler), contoh gula/glukosa ($C_6H_{12}O_6$) atau bahan organik lainnya diubah menjadi CO_2 dan H_2O. Energi yang tersimpan dalam molekul organik (gula) dapat digunakan untuk melaksanakan kerja sel. Sebaliknya proses pemakaian energi untuk membangun molekul kompleks dari molekul-molekul lebih sederhana disebut anabolisme, contoh pada proses sintesis asam amino menjadi protein. Pada proses metabolisme sesungguhnya dapat terjadi dari proses katabolisme dilanjutkan dengan proses anabolisme atau sebaliknya dari proses anabolisme menjadi proses katabolisme.

Metabolisme meliputi proses sintesis (*anabolisme*) dan proses penguraian (*katabolisme*) senyawa atau komponen dalam sel hidup. Semua reaksi metabolisme dikatalis oleh enzim. Hal lain yang penting dalam metabolisme adalah peranannya dalam penawar racun atau detoksifikasi, yaitu mekanisme reaksi pengubahan zat yang beracun menjadi senyawa tak beracun yang dapat dikeluarkan dari tubuh. Anabolisme dibedakan dengan katabolisme dalam beberapa hal:

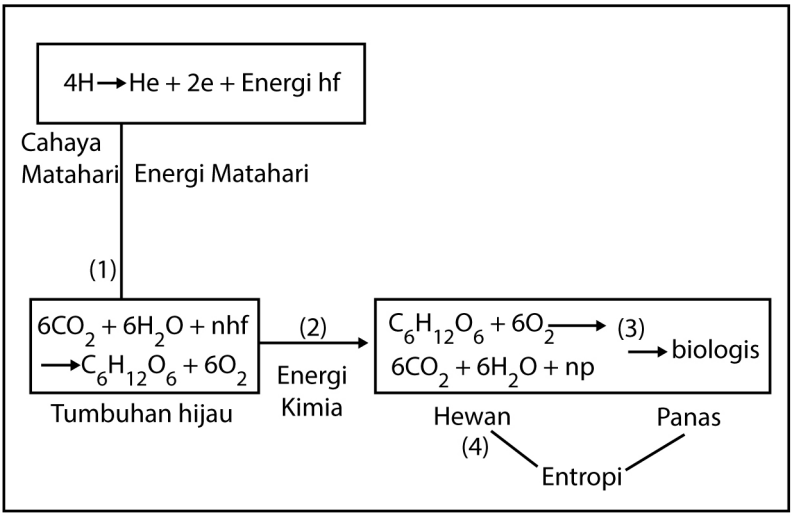
1. anabolisme merupakan proses sintesis molekul kimia kecil menjadi molekul kimia yang lebih besar, sedangkan katabolisme merupakan proses penguraian molekul besar menjadi molekul kecil;

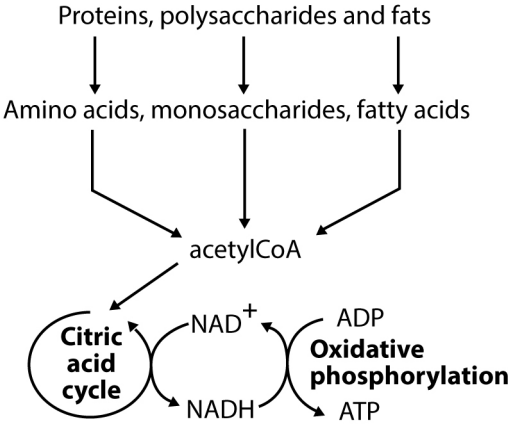
2. anabolisme merupakan proses membutuhkan energi, sedangkan katabolisme melepaskan energi;
3. anabolisme merupakan reaksi reduksi, katabolisme merupakan reaksi oksidasi;
4. hasil akhir anabolisme adalah senyawa pemula untuk proses katabolisme.

Proses metabolisme yang terjadi di dalam sel merupakan aktivitas yang sangat terkoordinasi, melibatkan kerja sama berbagai sistem enzim yang mengkatalis reaksi-reaksi secara bertahap dan memerlukan pengaturan metabolic untuk mengendalikan mekanisme reaksinya. Proses metabolisme bagi organisme hidup memiliki tiga fungsi spesifik, yaitu untuk:

1. memperoleh energi kimia dalam bentuk ATP dari hasil degradasi zat-zat makanan yang kaya energi yang berasal dari lingkungan;
2. mengubah molekul zat-zat makanan (nutrisi) menjadi perkursor unit pembangun bagi biomolekul sel;
3. menyusun unit-unit pembangun menjadi protein, asam nikleat, lipida, polisakarida, dan komponen sel lain. Untuk membentuk dan merombak biomolekul.

Energi merupakan dasar dari seluruh proses metabolisme sehingga untuk memahami proses metabolisme perlu dipahami lebih dahulu tentang energi. Energi untuk berbagai fungsi tubuh manusia berasal dari molekul nutrisi yang telah dimetabolisme. Bahkan, tujuan utama dari asupan makanan adalah pasokan energi. Energi ini berasal dari lemak, karbohidrat, dan protein dalam makanan. Dari ketiganya, lemak merupakan sumber energi yang paling terkonsentrasi karena memoles lebih dari dua kali banyak energi untuk berat tertentu sebagai protein atau karbohidrat.





Sumber: Ilustrasi Haryana

Gambar 1.40
Transformasi Energi dalam Metabolisme

Bagan itu dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Selama proses fotosintesis, energi matahari yaitu dalam bentuk radiasi atau pancaran cahaya matahari berubah menjadi energi kimia dalam ikatan

senyawa organik. Lambang *f* merupakan frekuensi cahaya dan lambang *h* merupakan konstanta Planck, yang berkaitan dengan energi dan frekuensi.
2. Pada waktu respirasi sel, energi kimia dalam senyawa kimia berubah menjadi persenyawaan yang berupa ATP.
3. Dalam sel, energi kimia ikatan fosfat yang kaya akan energi (ATP) dapat difungsikan untuk kerja mekanis, listrik, dan kimia.
4. Pada akhirnya energi mengalir ke sekeliling sel dan hilang sebagai energi panas dalam bentuk "entropi".

A. TRANFORMASI ENERGI

Energi adalah kapasitas atau kemampuan untuk melaksanakan kerja. Aktivitas kerja pada materi di dalam sel dapat terjadi karena gesekan atau karena proses gravitasi. Energi juga merupakan kemampuan untuk mendaur ulang suatu kumpulan materi (misalkan kotoran ternak menjadi kompos). Setiap materi yang berpindah atau bergerak memiliki bentuk energi yang disebut sebagai energi kinetik atau energi gerak.

Objek atau benda (materi di dalam sel) bergerak melakukan kerja dengan cara menggerakkan benda lain, contoh misalnya kontraksi otot kaki akan menggerakkan atau mendorong pedal sepeda. Cahaya juga merupakan bentuk energi kinetik yang dapat digunakan untuk melakukan kerja seperti proses fotosintesis pada tumbuhan hijau. Panas atau energi termal juga merupakan energi kinetik yang dihasilkan dari proses pergerakan molekul secara acak.

Suatu objek yang sedang diam dan tidak bergerak masih tetap memiliki energi yang merupakan kapasitas untuk melakukan kerja. Energi tersimpan (energi potensial) adalah energi yang dimiliki oleh materi karena lokasi atau strukturnya, contoh air dalam bendungan menyimpan energi karena ketinggiannya. Contoh lainnya adalah energi kimia yang tersimpan dalam molekul yaitu bentuk energi karena perbedaan struktur atom-atomnya.

Proses transformasi energi dalam sistem biologi dapat dibedakan menjadi tiga proses berikut.

1. Transformasi Energi oleh Klorofil

Energi radiasi sinar matahari yang ditangkap oleh klorofil kemudian diubah menjadi energi kimia melalui proses fotosintesis. Energi kimia tersebut digunakan untuk menyintesis CO_2 dan H_2O menjadi glukosa dan senyawa kompleks lainnya sebagai energi pengikat dan penghubung inti-inti atom yang

tersimpan dalam bentuk senyawa karbohidrat (sebagai bahan makanan). Jadi, energi radiasi matahari yang berbentuk energi kinetik diubah menjadi energi potensial dan energi kimiawi yang disimpan dalam molekul karbohidrat dan bahan makanan lainnya sebagai energi ikatan yang menghubungkan atom-atom bakunya.

2. Transformasi Energi oleh Mitokondria

Di dalam mitokondria energi kimia digunakan untuk mengubah karbohidrat dan senyawa lainnya sebagai energi ikatan fosfat melalui respirasi sel untuk oksidasi DNA, RNA, protein, dan lemak. Mitokondria banyak terdapat pada sel-sel otot makhluk hidup dan sel-sel saraf.

3. Transformasi Energi oleh Sel

Jika sel melakukan kegiatan maka energi kimiawi dari ikatan fosfat akan terlepas dan berubah menjadi energi bentuk lain seperti energi mekanik untuk kerja kontraksi otot, energi listrik untuk meneruskan impuls saraf, energi sintesis untuk membangun senyawa pertumbuhan, serta sisanya akan mengalir ke sekeliling sel dan hilang sebagai energi panas. Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, pada saat berlangsungnya proses metabolisme dalam sel makhluk hidup, ada beberapa komponen penting yang berperan di dalamnya yaitu adanya aktivitas enzim, dihasilkan energi tinggi berupa *Adenosin Trifosfat* (ATP) dan reaksi oksidasi reduksi (pelepasan dan pembebasan) elektron.

Pengaturan konversi atau pemindahan energi mengikuti hukum termodinamika. Termodinamika adalah studi mengenai transformasi energi yang terjadi pada materi.

a. Hukum Termodinamika 1

Perubahan bentuk (transformasi energi) yang terjadi dalam suatu kumpulan materi disebut termodinamika. Sistem digunakan untuk menyatakan materi yang sedang dipelajari. Transformasi yang terjadi di luar sistem, energi dapat ditransfer atau dipindahkan ke sistem lainnya. Sebaliknya sistem yang terjadi hanya di dalam materi disebut sistem tertutup. Energi dapat ditransfer dan ditransformasikan, akan tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan disebut dengan hukum kekekalan energi atau Hukum Termodinamika 1, contoh cara mengubah cahaya menjadi energi kimia pada tumbuhan hijau (sebagai pentransformasi energi), bukan sebagai produsen.

b. Hukum Termodinamika 2

Setiap transformasi energi dapat membuat jagat raya atau organel sel menjadi tidak teratur. Ukuran ketidakteraturan atau terjadinya proses pengacakan di jagat raya atau di dalam sel disebut dengan *entropi*. Semakin acak suatu kumpulan materi (di dalam sel) maka nilai entropi-nya semakin besar. Hukum Termodinamika 2 berbunyi setiap transfer atau transformasi energi akan meningkatkan entropi jagat raya. Pada banyak kasus bahwa peningkatan entropi sangat jelas terlihat pada kerusakan fisik suatu struktur sistem, contoh pada proses pelapukan materi terjadi peningkatan entropi di jagat raya. Contoh lain misalnya 25% energi kimia yang tersimpan dalam tangki bahan bakar mobil digunakan untuk menggerakkan mobil, sisanya 75% hilang sebagi panas yang tersebar di sekeliling mesin tersebut. Contoh lainnya adalah energi yang tersimpan dalam pakan atau makanan yang teserap dalam tubuh hanya sekitar 25% sisanya 25% digunakan dalam sel dan sebagian ikut terbuang (sisa metabolisme) yang dapat berupa CO_2, H_2O, dan bahan yang tidak dapat dicerna.

Jumlah energi bebas di dalam suatu sistem (G), total energi dalam sistem itu (H) dan entropi-nya (S), dan Suhu mutlak (T). Hubungan energi dalam suatu sistem hidup yang dipengaruhi oleh suhu adalah sebagi berikut:

$$G = H - TS$$

Suhu akan memperbesar entropi karena pemanasan. Hal ini karena suhu digunakan untuk mengukur intensitas gerak dalam molekul yang terletak dalam sel. Ketidakteraturan molekul di dalam sel ini akan menghasilkan panas yang berbeda. Tidak semua energi yang tersimpan di dalam sistem (H) dapat dimanfaatkan untuk melakukan kerja. Dengan demikian, untuk menghitung kapasitas maksimum sistem itu dalam melakukan kerja maka kita perlu mengurangi energi total akibat dari ketidakteraturannya di dalam sistem. Pada setiap proses yang terjadi secara spontan maka energi bebas dalam sistem itu akan berkurang. Perubahan energi bebas ketika sistem bergerak dari suatu keadaan tertentu ke suatu keadaan yang berbeda digambarkan dengan persamaan:

$$\Delta G = G_{akhir} - G_{awal} \text{ dengan kata lain } \Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Terdapat suatu hubungan penting antara energi bebas dan kesetimbangan, termasuk kesetimbangan kimia dalam sel. Energi bebas meningkat ketika suatu reaksi bergerak menjauhi kesetimbangan. Untuk reaksi yang berada pada

kesetimbangan, maka perubahan energi adalah sama dengan nol karena tidak ada perubahan neto (bersih) dalam sistem itu.

Reaksi eksergonik dan endergonik dalam metabolisme. Berdasarkan perubahan energi bebasnya, reaksi kimiawi dapat dikelompokkan sebagai reaksi eksergonik (yang artinya "mengeluarkan energi") atau reaksi endergonik (yang artinya "memasukkan energi"). Suatu rekasi eksergonik berlangsung dengan mengeluarkan energi bebas. Karena campuran kimiawi kehilangan energi bebas, ΔG adalah negatif untuk suatu reaksi eksergonik. Dengan kata lain, reaksi-reaksi eksergonik adalah yang terjadi secara spontan. Besarnya ΔG untuk suatu reaksi eksergonik adalah jumlah keja maksimum yang dapat dilakukan oleh reaksi itu. Kita dapat menggunakan contoh reaksi keseluruhan respirasi seluler sebagai berikut:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$$

$$\Delta G = -686 \text{ kkal/mol } (-2870 \text{ kJ/mol})$$

Untuk setiap mol (180 g) glukosa yang dirombak melalui respirasi, dihasilkan 686 kilokalori atau (2870 kilojoule) energi yang biasa digunakan untuk melakukan kerja (di bawah kondisi yang disebut para saintis sebagai kondisi standar). Karena energi harus kekal, produk kimiawi hasil respirasi menyimpan lebih sedikir 686 kkal energi bebas dibandingkan reaktan. Pada intinya, hasilnya adalah sebuah proses yang menghabiskan energi dengan menyerap sebagian besar energi bebas yang tersimpan dalam molekul gula.

Suatu reaksi endergonik merupakan reaksi yang menyerap energi bebas dari sekelilingnya. Karena jenis reaksi ini menyimpan energi bebas dalam molekul, maka ΔG adalah positif. Reaksi energi itu adalah nonspontan, dan besar ΔG adalah jumlah energi yang diperlukan untuk menggerakkan reaksi itu. Jika suatu proses kimiawi adalah bersifat eksergonik (menuruni bukit) dalam satu arah maka proses kebalikannya harusnya endergonik (mendaki bukit). Suatu proses reversibel tidak akan menuruni bukit pada kedua arah yang berlawanan tersebut. Jika ΔG = -686 kkal/mol untuk respirasi agar fotosintesis dapat menghasilkan gula dari karbondioksida dan air maka harus mempunyai nilai ΔG= +686 kkal/mol. Produksi gula dalam sel-sel daun suatu tumbuhan sangat endergonik, suatu proses mendaki bukit yang digerakkan oleh penyerapan energi cahaya matahari.

Suatu kerja sel melalui tiga jenis kerja yang utama, yaitu kerja:
1) *mekanis,* seperti getaran silia, kontraksi sel otot dan pergerakan kromosom selama reproduksi seluler;
2) *transpor,* pemompaan bahan-bahan melewati membran melawan arah pergerakan spontan;
3) *kimiawi,* pendorongan reaksi endergonik yang tidak akan terjadi secara spontan, seperti sintesis polimer dari monomer-monomer.

Pada sebagian besar kasus, sumber energi yang akan segera menggerakkan kerja seluler adalah Adenosine Triphosphate (ATP). ATP adalah sebuah nukleotida yang dikenal di dunia biokimia sebagai zat yang paling bertanggung jawab dalam perpindahan energi intraseluler. ATP mampu menyimpan dan memindahkan energi kimia di dalam sel. ATP juga memiliki peran penting dalam produksi *nucleic acids*.

a. Struktur dan hidrolisis ATP

Molekul-molekul ATP juga digunakan untuk menyimpan bahan pembentuk energi yang diproduksi oleh respirasi sel. ATP sangat erat hubungannya dengan satu jenis nukleotida yang ditemukan dalam asam nukleat. ATP memiliki basa nitrogen adenin yang berkaitan dengan ribosa, seperti pada nukleotida adenin pada RNA. Akan tetapi, pada RNA, satu gugus fosfat berkaitan dengan ribosa. Adenin trifosfat memiliki suatu rentai yang mempunyai tiga gugus fosfat yang berkaitan dengan ribosa.

Secara kimiawi, ATP terdiri dari adenosine dan tiga kelompok phosphate. Rumus empirisnya adalah $C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$, rumus kimianya adalah $C_{10}H_8N_4O_2NH_2(OH)_2(PO_3H)_3H$. Massa molekulernya adalah sebesar 507.184 u. Kelompok phosphor yang dimulai dari AMP disebut sebagai *phosphate alpha, beta* dan *gamma*. Ikatan antara gugus-gugus fosfat pada ekor ATP dapat diputuskan melalui hidrolisis. Ketika ikatan fosfat terminal diputuskan, suatu molekul fosfat anorganik (yang disingkat P_i) meninggalkan ATP yang kemudian menjadi adenosin difosfat atau ADP. Reaksi itu adalah eksergonik ada di bawah kondisi laboratorium, membebaskan 7,3 kkal energi per mol ATP yang dihidrolisis:

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i$$
$$\Delta G = -7{,}3 \text{ kkal/mol } (-31 \text{ kJ/mol})$$

Inilah perubahan energi bebas yang diukur pada kondisi standar. Akan tetapi, kondisi kimiawi dan fisik dalam sel tidak sesuai dengan kondisi standar. Ketika reaksi terjadi dalam lingkungan seluler bukan dalam tabung reaksi, ΔG sesungguhnya adalah sekitar -13 kkla/mol, 78% lebih besar daripada energi yang dihasilkan oleh hidrolisis ATP pada kondisi standar.

Karena hidrolisisnya membebaskan energi, ikatan fosfat ATP sering kali disebut jga sebagi ikatan fosfat berenergi tinggi, akan tetapi istilah itu sesungguhnya menyesatkan. ATP umumnya bukanlah ikatan kuat, seperti yang tersirat dalam kata "berenergi tinggi" itu. Pada kenyataannya, dibandingkan dengan sebagian besar ikatan pada molekul organik, ikatan ini relatif lemah, dan karena ikatan tersebut agak kurang stabil maka hidrolisisnya menghasilkan energi. Produk hidrolisis (ADP dan P_i) lebih stabil dibandingkan dengan ATP. Ketika suatu sistem berubah ke arah yang elbih stabil, perubahan itu bersifat eksergonik. Dengan demikian, pembebasan energi selama hidrolisis ATP berasal dari suatu perubahan kimiawi menuju keadaan yang lebih stabil, bukan dari ikatan fosfat itu sendiri. Kenapa ikatan fosfat sedemikian rapuhnya? Jika kita memeriksa ulang molekul ATP, kita dapat mengetahui atau melihat bahwa ketiga gugus fosfatnya bermuatan negatif. Muatan-muatan yang sama seperti ini jika mengumpul tidak dapat tenang, dan tolak-menolak antara muatan tersebut menyebabkan ketidakstabilan daerah molekul ATP ini. Ekor trifosfat ATP merupakan ekuivalensi kimiawi (kesetaraan tetapi yang bersifat kimiawi) dengan per atau pegas yang diberikan beban.

b. Cara Kerja ATP

Ketika ATP dihidrolisis dalam suatu tabung reaksi, pelepasan energi bebas hanya sedikit memanaskan air di sekelilingnya. Dalam sel, keadaan seperti itu menjadi suatu penggunaan sumber daya energi yang tidak efisien dan berbahaya. Dengan bantuan enzim spesifik, sel itu akan mampu mengkopel energi hasil hidrolisis ATP secara langsung ke proses endergonik dengan cara mentransfer suatu gugus fosfat dari ATP ke beberapa molekul lain. Penerima gugus fosfat itu kemudian disebut terfosforilasi. Kunci untuk pengkopelan tersebut adalah pembentukan intermediet terfosforilasi ini yang lebih reaktif (kurang stabil) ika dibandingkan dengan molekul semula. Hampir semua kerja seluler bergantung pada pemberian energi ATP ke molekul lain melalui transfer gugus fosfat. Misalnya, ATP akan menggerakkan (memberi tenaga) pada pergerakan otot dengan cara mentransfer fosfat ke protein kontraktil otot.

Suatu organisme yang sedang bekerja menggunakan ATP secara terus-menerus, akan tetapi ATP adalah sumber daya yang dapat diperbaharui, yang dapat diregenerasi dengan cara penambahan fosfat ke ADP. Siklus ATP bergerak dengan laju yang sangat cepat. Misalnya, suatu sel otot yang sedang bekerja mendaur ulang seluruh kumpulan ATP setiap menit. Laju pergantian seperit itu menggambarkan 10 juta molekul ATP yang dikonsumsi dan diregenerasi per detik oleh setiap sel. Jika ATP diregenerasi melalui fosforilasi ADP maka manusia akan mengonsumsi ATP hampir seberat tubuhnya setiap hari.

Karena suatu proses reversibel tidak dapat berjalan menuruni bukit pada kedua arah, regenerasi ATP dari ADP pada prinsipnya adalah endergonik: Jalur katabolik (eksergonik), khususnya respirasi seluler, menyediakan energi untuk proses endergonik untuk pembuatan ATP. Tumbuhan juga menggunakan energi cahaya untuk menghasilkan ATP. Dengan demikian, siklus ATP adalah suatu pintu putar yang dilalui energi pada waktu pemindahan dari proses katabolik ke jalur anabolik.

B. PROSES FOTOSINTESIS

Fotosintesis adalah proses biokimia pembentukan zat makanan karbohidrat yang dilakukan oleh tumbuhan, terutama tumbuhan yang mengandung zat hijau daun atau klorofil. Selain tumbuhan berklorofil, makhluk hidup nonklorofil lain yang berfotosintesis adalah alga dan beberapa jenis bakteri. Organisme ini berfotosintesis dengan menggunakan zat hara, karbon dioksida, dan air serta bantuan energi cahaya matahari (**photo** = cahaya, **synthesis** = proses pembuatan/pengolahan). Fotosintesis sangat penting bagi kehidupan di bumi karena hampir semua makhluk hidup bergantung pada energi yang dihasilkan oleh proses fotosintesis.

Tumbuhan hijau menggunakan gas karbondioksida, air, dan energi dari sinar matahari untuk membuat makanan melalui proses fotosintesis. Di dalam sel tumbuhan hijau terdapat organel yang disebut kloroplas. Di dalam kloroplas terkandung klorofil. Daun tumbuhan nampak hijau karena klorofil menyerap sebagian besar cahaya pada panjang gelombang sinar yang tampak, kecuali gelombang cahaya hijau. Karena sebagian besar panjang gelombang cahaya hijau tidak diserap oleh klorofil, maka akan dipantulkan oleh daun tumbuhan dan diterima oleh mata kita. Sinar yang diserap oleh klorofil memberikan energi yang diperlukan untuk fotosintesis. Kloroplas mengandung pigmen lain selain

klorofil. Pigmen-pigmen ini juga menyerap sinar yang tampak dari sinar matahari yang juga memberikan sejumlah energi untuk fotosintesis. Bila klorofil rusak, daun tumbuhan tidak akan berwarna hijau untuk waktu yang lama. Klorofil ini harus ada dalam daun tumbuhan agar terjadi proses fotosintesis.

Fotosintesis sangat penting bagi semua kehidupan aerobik di Bumi karena selain untuk menjaga tingkat normal oksigen di atmosfer, fotosintesis juga merupakan sumber energi bagi hampir semua kehidupan di Bumi, baik secara langsung (melalui produksi primer) maupun tidak langsung (sebagai sumber utama energi dalam makanan mereka. Oleh karena itu, fungsi fotosintesis dapat dikelompokkan sebagai berikut:

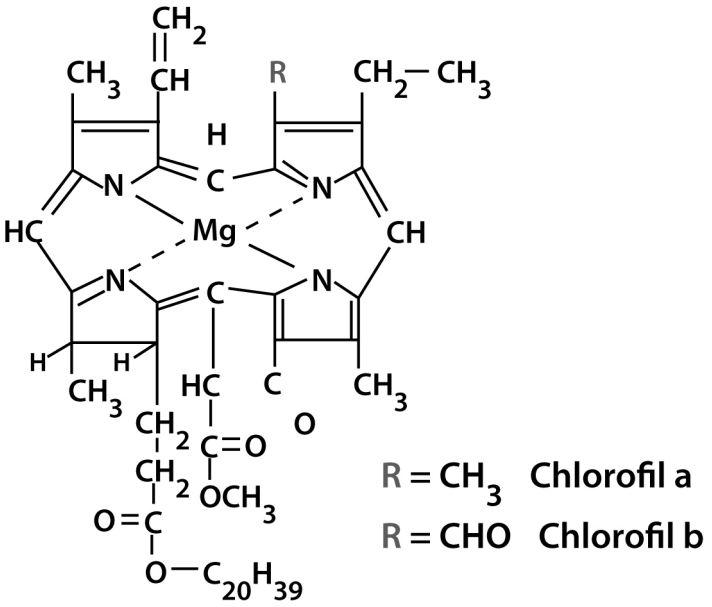
1. Fungsi utama fotosintesis untuk memproduksi zat makanan berupa glukosa. Glukosa menjadi bahan bakar dasar pembangun zat makanan lainnya, yaitu lemak dan protein dalam tubuh tumbuhan. Zat-zat ini menjadi makanan bagi hewan maupun manusia. Oleh karena itu, kemampuan tumbuhan mengubah energi cahaya (sinar matahari) menjadi energi kimia (zat makanan) selalu menjadi mata rantai makanan.
2. Fotosintesis membantu membersihkan udara, yaitu mengurangi kadar CO_2 (karbon dioksida) di udara karena CO_2 adalah bahan baku dalam proses fotosintesis. Sebagai hasil akhirnya, selain zat makanan adalah O_2 (Oksigen) yang sangat dibutuhkan untuk kehidupan.
3. Kemampuan tumbuhan berfotosintetis selama masa hidupnya menyebabkan sisa-sisa tumbuhan yang hidup masa lalu tertimbun di dalam tanah selama berjuta-juta tahun menjadi batubara menjadi salah satu sumber energi saat ini.

Tumbuhan bersifat autotrof. Autotrof artinya dapat menyintesis makanan langsung dari senyawa anorganik. Tumbuhan menggunakan karbon dioksida dan air untuk menghasilkan gula dan oksigen yang diperlukan sebagai makanannya. Energi untuk menjalankan proses ini berasal dari fotosintesis. Berikut ini, adalah persamaan reaksi fotosintesis yang menghasilkan glukosa:

$$\mathbf{6H_2O + 6CO_2 + cahaya \rightarrow C_6H_{12}O_6\,(glukosa) + 6O_2}$$

Glukosa dapat digunakan untuk membentuk senyawa organik lain seperti selulosa dan dapat pula digunakan sebagai bahan bakar. Proses ini berlangsung melalui respirasi seluler yang terjadi baik pada hewan maupun tumbuhan. Secara umum, reaksi yang terjadi pada respirasi seluler berkebalikan dengan persamaan di atas. Pada respirasi, gula (glukosa) dan senyawa lain akan bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan karbon dioksida, air, dan energi kimia.

Tumbuhan menangkap cahaya menggunakan pigmen yang disebut klorofil. Pigmen inilah yang memberi warna hijau pada tumbuhan. Klorofil terdapat dalam organel yang disebut kloroplas. Klorofil menyerap cahaya yang akan digunakan dalam fotosintesis. Meskipun seluruh bagian tubuh tumbuhan yang berwarna hijau mengandung kloroplas, namun sebagian besar energi dihasilkan di daun. Di dalam daun terdapat lapisan sel yang disebut mesofil yang mengandung setengah juta kloroplas setiap milimeter perseginya. Cahaya akan melewati lapisan epidermis tanpa warna dan yang transparan, menuju mesofil, tempat terjadinya sebagian besar proses fotosintesis. Permukaan daun biasanya dilapisi oleh kutikula dari lilin yang bersifat anti air untuk mencegah terjadinya penyerapan sinar Matahari ataupun penguapan air yang berlebihan.

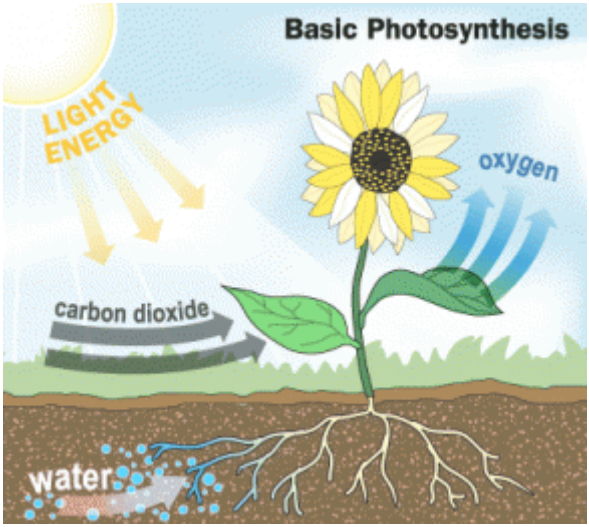


Gambar 1.41
Struktur Klorofil

Gula adalah makanan yang dihasilkan oleh tumbuhan. Makanan yang tidak langsung digunakan oleh tumbuhan, dapat disimpan dalam akar, batang, daun, buah, dan biji. Gula yang dibuat selama fotosintesis akan dipecah dan digunakan untuk menyusun molekul-molekul lain untuk pertumbuhan tanaman tersebut. Jika gula dipecah, akan dihasilkan energi. Energi yang dihasilkan dari

pemecahan gula tersebut ternyata digunakan tidak hanya untuk kebutuhan tanaman tersebut, tetapi juga diperlukan bagi proses kehidupan semua jenis makhluk hidup.

Tumbuhan membutuhkan sinar matahari, air, dan udara untuk membuat makanannya sendiri. Setiap hari, zat hijau daun pada daun tanaman menyerap cahaya matahari. Tumbuhan memanfaatkan cahaya matahari menjadi karbon dioksida dari udara, dan air dari tanah menjadi makanan yang mengandung gula. Tumbuhan lalu mengeluarkan oksigen sebagai hasil yang tidak terpakai, walaupun sebagian digunakan untuk bernapas. Untuk lebih jelasnya lihat gambar berikut.



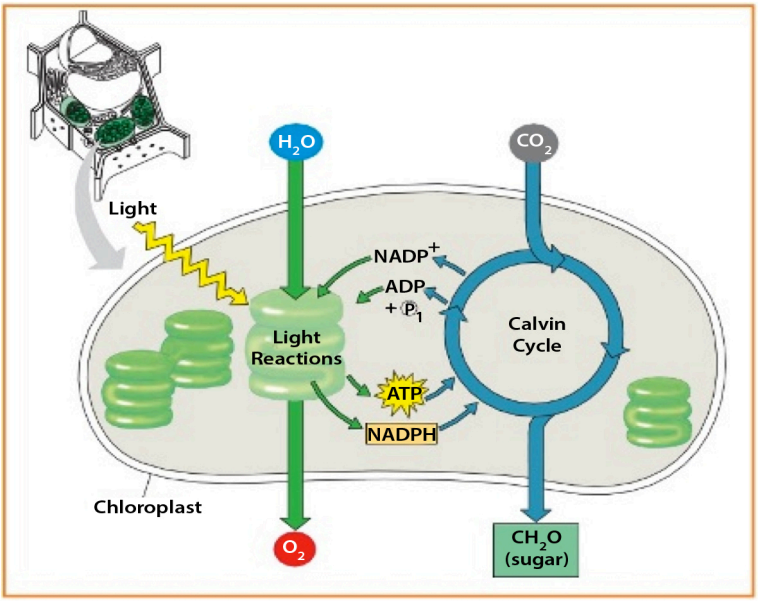
Gambar 1.42
Dasar Fotosintesis

Dalam proses fotosintesis terjadi 2 reaksi yang saling berhubungan. Berikut ini uraiannya.

1. Reaksi Terang

Reaksi terang merupakan proses yang pada akhirnya menghasilkan ATP juga NADPH2. Dalam reaksi ini diperlukan molekul air. Proses reaksi terang dimulai dengan menangkap foton yang dilakukan oleh pigmen klorofil yang berperan sebagai antenna. Di dalam daun, cahaya akan diserap melalui molekul

klorofil dan kemudian dikumpulkan pada pusat-pusat reaksi. Fotosintesis dimulai pada saat cahaya mulai mengionisasi molekul klorofil dan kemudian terjadi pelepasan elektron. Reaksi terang berlangsung di dalam membran tilakoid di grana. Grana adalah struktur bentukan membran tilakoid yang terbentuk dalam stroma, yaitu salah satu ruangan dalam kloroplas. Di dalam grana terdapat klorofil, yaitu pigmen yang berperan dalam fotosintesis. Reaksi terang di sebut juga fotolisis karena proses penyerapan energi cahaya dan penguraian molekul air menjadi oksigen dan hidrogen.



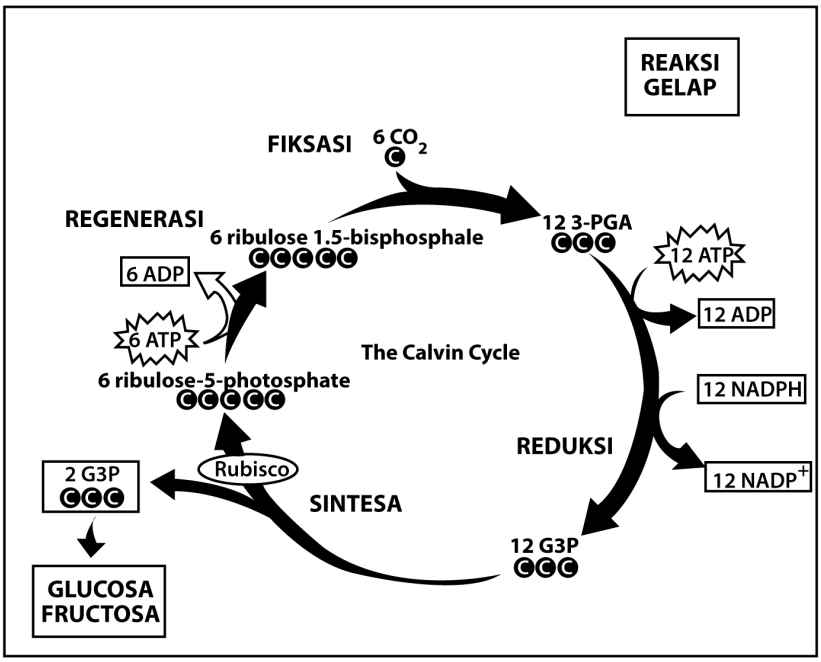
Sumber: http://www.catatanilmu.com

Gambar 1.43
Reaksi Terang

2. Reaksi Gelap

Reaksi gelap adalah proses di mana ATP dan juga NADPH yang dihasilkan dalam proses sebelumnya kemudian menghasilkan sejumlah proses atau reaksi biokimia. Pada tumbuhan sendiri, reaksi biokimia ini akan terjadi siklus calvin di mana karbondioksida akan diikat dengan tujuan membentuk ribose dan lebih lanjut akan menjadi glukosa. Reaksi ini tidak bergantung pada ada atau tidaknya

cahaya matahari. Reaksi gelap berlangsung di dalam stroma. Reaksi yang membentuk gula dari bahan dasar CO_2 yang diperoleh dari udara dan energi yang diperoleh dari reaksi terang. Tidak membutuhkan cahaya matahari, tetapi tidak dapat berlangsung jika belum terjadi siklus terang karena energi yang dipakai berasal dari reaksi terang.



Sumber: http://www.catatanilmu.com

Gambar 1.44
Reaksi Gelap

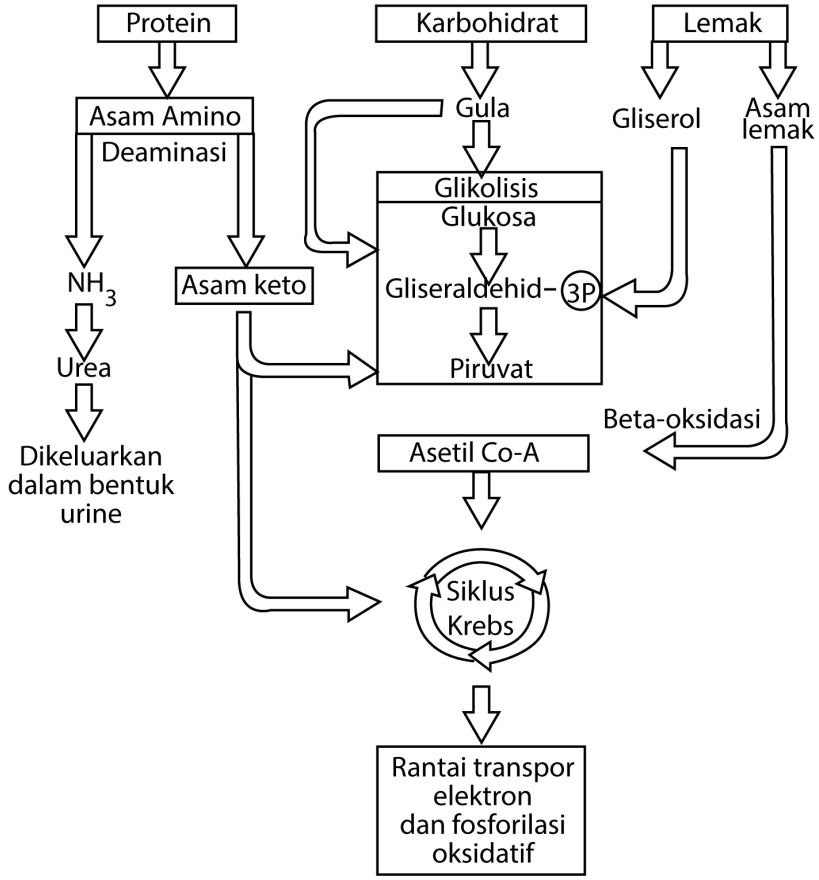
Ada dua macam siklus, yaitu siklus Calin-Benson dan siklus hatch-Slack. Pada siklus Calin-Benson, tumbuhan menghasilkan senyawa dengan jumlah atom karbon tiga, yaitu senyawa 3-fosfogliserat. Siklus ini dibantu oleh enzim rubisco. Pada siklus hatch-Slack, tumbuhan menghasilkan senyawa dengan jumlah atom karbon empat. Enzim yang berperan adalah *phosphoenolpyruvate carboxylase*. produk akhir siklus gelap diperoleh glukosa yang dipakai tumbuhan untuk aktivitasnya atau disimpan sebagai cadangan energi.

C. METABOLISME KARBOHIDRAT

Proses metabolisme karbohidrat secara garis besar terdiri dari dua cakupan yakni reaksi pemecahan atau katabolisme dan reaksi pembentukan atau anabolisme. Pada proses pembentukan, salah satu unsur yang harus terpenuhi adalah energi. Energi ini dihasilkan dari proses katabolisme. Sementara itu, tahapan metabolisme sendiri terdiri atas beberapa bagian yakni glikolisis, oksidasi piruvat ke asetil-KoA, glikogenesis, glikogenolisis, hexose monophosphate shunt dan terakhir adalah Glukoneogenesis.

Lintasan metabolisme dapat digolongkan menjadi 3 kategori.

1. Lintasan anabolik (penyatuan/pembentukan)
   Ini merupakan lintasan yang digunakan pada sintesis senyawa **pembentuk** struktur dan mesin tubuh. Salah satu contoh dari kategori ini adalah sintesis protein.
2. Lintasan katabolik (pemecahan)
   Lintasan ini meliputi berbagai proses **oksidasi** yang melepaskan energi bebas, biasanya dalam bentuk fosfat energi tinggi atau unsur ekuivalen pereduksi, seperti rantai respirasi dan fosforilasi oksidatif.
3. Lintasan amfibolik (persimpangan)
   Lintasan ini memiliki lebih dari satu fungsi dan terdapat pada **persimpangan** metabolisme sehingga bekerja sebagai penghubung antara lintasan anabolik dan lintasan katabolik. Contoh dari lintasan ini adalah siklus asam sitrat (Siklus Kreb).



Sumber: Biology Solomon

Gambar 1.45
Siklus Metabolisme Karbohidrat

Berikut ini macam-macam metabolisme karbohidrat pada manusia.

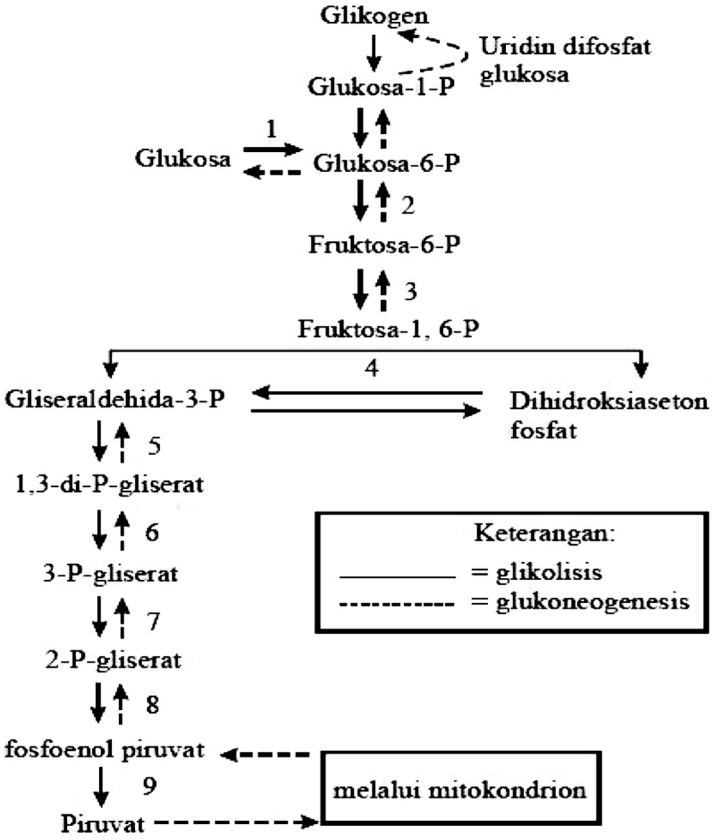
1. Glikolisis

Glikolisis adalah serangkaian reaksi biokimia di mana glukosa dioksidasi menjadi molekul asam piruvat. Glikolisis adalah salah satu proses metabolisme yang paling universal yang kita kenal, dan terjadi (dengan berbagai variasi) di banyak jenis sel dalam hampir seluruh bentuk organisme. Proses glikolisis

sendiri menghasilkan lebih sedikit energi per molekul glukosa dibandingkan dengan oksidasi aerobik yang sempurna. Energi yang dihasilkan disimpan dalam senyawa organik berupa *adenosine triphosphate* atau yang lebih umum dikenal dengan istilah ATP dan NADH.

Proses glikolisis mencakup oksidasi glukosa atau glikogen yang diurai menjadi piruvat juga laktat dengan jalan emben-meyerhof Pathway atau biasa disingkat EMP. Proses glikolisis ini terjadi di semua jaringan. Proses selanjutnya adalah oksidasi piruvat ke asetik KoA. Langkah ini dibutuhkan sebelum proses masuknya hasil glikolisis di dalam siklus asam nitrat yang merupakan jalan akhir oksidasi semua komponen senyawa protein, karbohidrat, dan juga lemak. Sebelum asam piruvat memasuki asam nitrat, ia terlebih dahulu harus disalurkan ke mitokondria dengan jalan transport piruvat khusus yang membantu pasasi melewati membran di area mitokondria. Setelah sampai di wilayah mitokondria, piruvat mengalami proses dekarboksilasi dan diolah menjadi senyawa asetil KoA. Proses dekarboksilasi ini terjadi karena bantuan tiamin difosfat yang berperan sebagai derivate hidroksietil cincin tiazol dan terkait dengan enzim.

Pada peristiwa glikolisis aerob dihasilkan piruvat, sedangkan pada glikolisis anaerob dihasilkan laktat melalui piruvat. Proses glikolisis secara keseluruhan ditunjukkan oleh skema pada Gambar di bawah ini.



Gambar 1.46
Skema proses glikolisis secara Keseluruhan

2. Glikogenesis

Glikogenesis adalah proses pembentukan glikogen dari glukosa. Proses pembentukan glikogen sebagai berikut.

a. Tahap pertama adalah pembentukan glukosa-6-fosfat dari glukosa, dengan bantuan enzim glukokinase dan mendapat tambahan energi dari ATP dan fosfat.
b. Glukosa-6-fosfat dengan enzim glukomutase menjadi glukosa-1-fosfat.
c. Glukosa-1-fosfat bereaksi dengan UTP (*Uridin Tri Phospat*) dikatalisis oleh uridil transferase menghasilkan *uridin difosfat glukosa* (UDP-glukosa) dan pirofosfat (PPi).

d. Tahap terakhir terjadi kondensasi antara UDP-glukosa dengan glukosa nomor satu dalam rantai glikogen primer menghasilkan rantai glikogen baru dengan tambahan satu unit glukosa.

Berikut ini, beberapa istilah yang berhubungan dengan metabolisme penguraian glukosa.

a. *Fermentasi* atau peragian adalah proses penguraian senyawa kimia glukosa tanpa oksigen melalui proses Glikolisis yang menghasilkan asam Piruvat, namun tidak berlanjut dengan siklus krebs dan transport Elektron karena suasana reaksi tanpa oksigen. Asam Piruvat kemudian akan diproses tanpa oksigen menjadi Asam piruvat (Fermentasi Asam Piruvat) atau Asam Piruvat menjadi Asetal dehide kemudian Alkohol dalam Fermentasi Alkohol. Fermentasi menghasilkan gas CO2. Dalam Fermentasi Alkohol.
b. *Glikolisis* adalah proses penguraian karbohidrat menjadi piruvat.
c. *Glikolisis anaerob* adalah proses penguraian karbohidrat menjadi laktat tanpa melibatkan O_2.
d. *Respirasi* adalah proses reaksi kimia yang terjadi apabila sel menyerap O_2, menghasilkan CO_2 dan H_2O. Respirasi dalam arti yang lebih khusus adalah proses-proses penguraian glukosa dengan menggunakan O_2, menghasilkan CO_2, H_2O, dan energi (dalam bentuk energi kimia, ATP) yang melibatkan metabolisme glikosis, Daur Krebs, dan fosforilase bersifat oksidasi.

3. Glukoneogenesis

Glukoneogenesis adalah pembentukan glukosa dari piruvat (kebalikan glikolisis). Sifat-*sifat peristiwa glukoneogenesis*, antara lain:

a. merupakan reaksi yang kompleks;
b. melibatkan beberapa enzim dan organel sel, yaitu mitokondrion;
c. terlebih dahulu mengubah piruvat menjadi malat;
d. metabolisme piruvat diangkut ke dalam mitokondrion dengan cara pengangkutan aktif melalui membran.

Glukoneogenesis penting sekali untuk menyediakan glukosa, apabila didalam diet tidak mengandung cukup karbohidrat. Syaraf, medulla dari ginjal, testes, jaringan embrio dan eritrosit memerlukan glukosa sebagai sumber utama penghasil energi. Glukosa diperlukan oleh jaringan adiposa untuk menjaga senyawa antara siklus asam sitrat. Di dalam mammae, glukosa diperlukan untuk

membuat laktosa. Didalam otot, glukosa merupakan satu-satunya bahan untuk membentuk energi dalam keadaan anaerobik.

Untuk membersihkan darah dari asam laktat yang selalu dibuat oleh sel darah merah dan otot, dan juga gliserol yang dilepas jaringan lemak, diperlukan suatu proses atau jalur yang bisa memanfaatkannya. Pada hewan memamah biak, asam propionat merupakan bahan utama untuk glukoneogenesis. Jalur yang dipakai dalam glukoneogenesis adalah modifikasi dan adaptasi dari jalur Embden-Meyerhof dan siklus asam sitrat.

Berikut ini, enzim tambahan yang diperlukan dalam proses ini selain dari enzim-enzim dalam kedua jalur di atas.

a. Piruvat karboksilase

   Dalam keadaan puasa, enzim piruvat karboksilase dan enzim fosfoenolpiruvat karboksikinase sintesisnya meningkat. Sintesis enzim ini juga dipengaruhi oleh hormon glukokortikoid. Dalam keadaan puasa, oksidasi asam lemak dalam hepar meningkat. Ini membawa akibat yang menguntungkan untuk glukoneogenesis karena akan menghasilkan ATP, NADH dan oksaloasetat.

   Asam lemak dan asetil-KoA akan menghambat enzim-enzim fosfofruktokinase, piruvat kinase dan piruvat dehidrogenase, mengaktifkan enzim-enzim piruvat karboksilase dan fruktosa 1,6-bisfosfatase.

b. Substrat untuk glukoneogenesis, adalah
   1) asam laktat yang berasal dari otot, sel darah merah, medulla dari glandula supra-renalis, retina dan sumsum tulang;
   2) gliserol, yang berasal dari jaringan lemak;
   3) asam propionat, yang dihasilkan dalam proses pencernaan pada hewan memamah biak;
   4) asam amino glikogenik.

c. Perubahan asam laktat menjadi glukosa

   Asam laktat di dalam sitoplasma diubah menjadi asam piruvat, kemudian asam piruvat masuk ke dalam mitokhondria dan diubah menjadi oksaloasetat. Karena oksaloasetat tidak dapat melewati membran mitokhondria, maka diubah dulu menjadi malat. Di sitoplasma malat diubah kembali menjadi oksaloasetat. Oksaloasetat kemudian diubah menjadi fosfoenolpiruvat yang selanjutnya berjalan ke arah kebalikan jalur Embden-Meyerhof dan akhirnya akan menjadi glukosa.

LATIHAN

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

1) Jelaskanlah apa perbedaan pada peristiwa metabolisme antara proses anabolisme dan katabolisme!
2) Jelaskan apa peranan Adenosine Triphosphate (ATP) dalam sistem tubuh!
3) Jelaskan apa perbedaan antara reaksi gelap dan reaksi terang pada proses fotosintesis!
4) Jelaskanlah apa yang dimaksud dengan proses glikolisis!
5) Jelaskan apa manfaat dari proses Glukoneogenesis!

Petunjuk Jawaban Latihan

Apabila Anda mengalami kesulitan dalam menjawab soal-soal di atas perhatikanlah jawaban di bawah ini sebagai acuan.

1) Metabolisme meliputi proses sintesis (*anabolisme*) dan proses penguraian (*katabolisme*) senyawa atau komponen dalam sel hidup. Anabolisme dibedakan dengan katabolisme dalam beberapa hal:
   a) anabolisme merupakan proses sintesis molekul kimia kecil menjadi molekul kimia yang lebih besar, sedangkan katabolisme merupakan proses penguraian molekul besar menjadi molekul kecil;
   b) anabolisme merupakan proses membutuhkan energi, sedangkan katabolisme melepaskan energi;
   c) anabolisme merupakan reaksi reduksi, katabolisme merupakan reaksi oksidasi;
   d) hasil akhir anabolisme adalah senyawa pemula untuk proses katabolisme.
2) Adenosine Triphosphate (ATP) adalah sebuah nukleotida yang dikenal di dunia biokimia sebagai zat yang paling bertanggung jawab dalam perpindahan energi intraseluler. ATP mampu menyimpan dan memindahkan energi kimia di dalam sel. ATP juga memiliki peran penting dalam produksi *nucleic acids*. Molekul-molekul ATP juga digunakan untuk menyimpan bahan pembentuk energi yang diproduksi oleh respirasi sel.

3) Reaksi terang merupakan proses yang pada akhirnya menghasilkan ATP juga NADPH2. Dalam reaksi ini diperlukan molekul air. Proses reaksi terang dimulai dengan menangkap foton yang dilakukan oleh pigmen klorofil yang berperan sebagai antenna. Di dalam daun, cahaya akan diserap melalui molekul klorofil dan kemudian dikumpulkan pada pusat-pusat reaksi. Sedangkan reaksi gelap berlangsung di dalam stroma. Reaksi yang membentuk gula dari bahan dasar CO_2 yang diperoleh dari udara dan energi yang diperoleh dari reaksi terang. Tidak membutuhkan cahaya matahari, tetapi tidak dapat berlangsung jika belum terjadi siklus terang karena energi yang dipakai berasal dari reaksi terang.
4) Glikolisis adalah serangkaian reaksi biokimia di mana glukosa dioksidasi menjadi molekul asam piruvat. Glikolisis adalah salah satu proses metabolisme yang paling universal yang kita kenal, dan terjadi (dengan berbagai variasi) di banyak jenis sel dalam hampir seluruh bentuk organisme. Proses glikolisis sendiri menghasilkan lebih sedikit energi per molekul glukosa dibandingkan dengan oksidasi aerobik yang sempurna. Energi yang dihasilkan disimpan dalam senyawa organik berupa *adenosine triphosphate* atau yang lebih umum dikenal dengan istilah ATP dan NADH.
5) Glukoneogenesis penting sekali untuk menyediakan glukosa, apabila didalam diet tidak mengandung cukup karbohidrat. Syaraf, medulla dari ginjal, testes, jaringan embrio dan eritrosit memerlukan glukosa sebagai sumber utama penghasil energi. Glukosa diperlukan oleh jaringan adiposa untuk menjaga senyawa antara siklus asam sitrat. Di dalam mammae, glukosa diperlukan untuk membuat laktosa. Di dalam otot, glukosa merupakan satu-satunya bahan untuk membentuk energi dalam keadaan anaerobik.

RANGKUMAN

Metabolisme meliputi proses sintesis (*anabolisme*) dan proses penguraian (*katabolisme*) senyawa atau komponen dalam sel hidup. Semua reaksi metabolisme dikatalis oleh enzim. Hal lain yang penting dalam metabolisme adalah peranannya dalam penawar racun atau detoksifikasi, yaitu mekanisme reaksi pengubahan zat yang beracun menjadi senyawa tak beracun yang dapat dikeluarkan dari tubuh. Energi merupakan dasar dari seluruh proses metabolisme sehingga untuk memahami proses metabolisme

perlu dipahami lebih dahulu tentang energi. Energi untuk berbagai fungsi tubuh manusia berasal dari molekul nutrisi yang telah dimetabolisme.

Proses transformasi energi dalam sistem biologi dapat dibedakan menjadi tiga proses berikut: (1) transformasi energi oleh klorofil, energi radiasi sinar matahari yang ditangkap oleh klorofil kemudian diubah menjadi energi kimia melalui proses fotosintesis, kemudian energi kimia tersebut digunakan untuk menyintesis CO_2 dan H_2O menjadi glukosa dan senyawa kompleks lainnya sebagai energi pengikat dan penghubung inti-inti atom yang tersimpan dalam bentuk senyawa karbohidrat (sebagai bahan makanan); (2) transformasi energi oleh mitokondria, di mana energi kimia digunakan untuk mengubah karbohidrat dan senyawa lainnya sebagai energi ikatan fosfat melalui respirasi sel untuk oksidasi DNA, RNA, protein, dan lemak; (3) transformasi energi oleh sel, ketika sel melakukan kegiatan, energi kimiawi dari ikatan fosfat akan terlepas dan berubah menjadi energi bentuk lain seperti energi mekanik untuk kerja kontraksi otot, energi listrik untuk meneruskan impuls saraf, energi sintesis untuk membangun senyawa pertumbuhan, serta sisanya akan mengalir ke sekeliling sel dan hilang sebagai energi panas.

Fotosintesis sangat penting bagi semua kehidupan aerobik di Bumi karena selain untuk menjaga tingkat normal oksigen di atmosfer, fotosintesis juga merupakan sumber energi bagi hampir semua kehidupan di Bumi, baik secara langsung (melalui produksi primer) maupun tidak langsung (sebagai sumber utama energi dalam makanan mereka.

TES FORMATIF 3

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1) Perhatikan pernyataan di bawah ini!
   (1) Anabolisme merupakan proses sintesis molekul kimia besar menjadi molekul kimia yang lebih kecil, sedangkan katabolisme merupakan proses penguraian molekul kecil menjadi molekul besar.
   (2) Anabolisme merupakan proses membutuhkan energi, sedangkan katabolisme melepaskan energi.
   (3) Anabolisme merupakan reaksi reduksi, katabolisme merupakan reaksi oksidasi.
   (4) Hasil akhir anabolisme adalah senyawa pemula untuk proses katabolisme.

Perbedaan antara proses anabolisme dan katabolisme dalam peristiwa metabolisme di antaranya adalah ....
A. (1), (2), dan (3)
B. (1), (3), dan (4)
C. (2), (3), dan (4)
D. (1), (2), (3), dan (4)

2) Pernyataan yang bukan merupakan fungsi proses metabolisme bagi organisme hidup adalah ....
A. untuk mencegah kristalisasi rantai-rantai asam lemak dengan menyusup di antara sel
B. untuk mengubah molekul zat-zat makanan (nutrisi) menjadi perkursor unit pembangun bagi biomolekul sel
C. untuk memperoleh energi kimia dalam bentuk ATP dari hasil degradasi zat-zat makanan yang kaya energi yang berasal dari lingkungan
D. untuk menyusun unit-unit pembangun menjadi protein, asam nikleat, lipida, polisakarida, dan komponen sel lain. Untuk membentuk dan merombak biomolekul

3) Perubahan energi kimia dalam senyawa kimia berubah menjadi persenyawaan yang berupa ATP dalam sel terjadi pada saat ....
A. fotosintesis
B. respirasi sel
C. pembelahan sel
D. setiap saat dalam sel

4) Proses Transformasi energi dalam sistem biologi dapat dilakukan oleh ....
A. klorofil, mikrotubula, dan sel
B. klorofil, dan retikulum endoplasma
C. mitokondria, dan sitoplasma
D. klorofil, mitokondria, dan sel

5) Pemompaan bahan-bahan melewati membran melawan arah pergerakan spontan, merupakan contoh dari kerja sel yang disebut kerja ....
A. mekanis
B. transpor
C. kimiawi
D. thermodinamik

6) Perhatikan pernyataan di bawah ini!
(1) Penting dalam produksi *nucleic acids*.
(2) Membentuk ikatan ester dengan asam fosfat

(3) Bertanggung jawab dalam perpindahan energi intraseluler
(4) Menyimpan dan memindahkan energi kimia di dalam sel

Pernyataan yang merupakan fungsi ATP adalah ....
A. (1), (2), dan (3)
B. (1), (3), dan (4)
C. (2), (3), dan (4)
D. semua pernyataan benar

7) Reaksi terang merupakan proses fotosintesis yang pada akhirnya menghasilkan ....
A. glukosa dan CO_2
B. glukosa dan ATP
C. glukosa dan $NADPH_2$
D. ATP juga $NADPH_2$

8) Proses yang **bukan** merupakan lintasan metabolisme karbohidrat adalah ....
A. analitik
B. anabolik
C. katabolik
D. amfibolik

9) Rangkaian reaksi biokimia di mana glukosa dioksidasi menjadi molekul asam piruvat, disebut ....
A. *cytosis*
B. osmosis
C. glikolisis
D. glikogenesis

10) Metabolisme karbohidrat yang disebut glukoneogenesis adalah reaksi biokimia di mana terjadi perubahan ….
A. glukosa dioksidasi menjadi molekul asam piruvat
B. pembentukan glukosa dari molekul asam piruvat
C. penguraian karbohidrat menjadi molekul asam piruvat
D. penguraian karbohidrat menjadi molekul asam laktat

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 3 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 3.

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

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

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 3, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

1) D. Tidak memiliki dinding sel.
2) B. Ribosom.
3) B. Prokariotik.
4) D. Dinding sel.
5) B. Sitoplasma.
6) B. Flagella.
7) D. Badan Golgi.
8) A. Actin filaments, intermediate filaments, dan microtubules.
9) D. Kloroplas.
10) B. Cristae.

Tes Formatif 2

1) A. Model Membran Mozaik Cair.
2) B. S.J. Singer dan Nicolson.
3) C. Fosfolipid.
4) D. Tingginya konsentrasi karbohidrat.
5) A. Transpor aktif.
6) D. Eksositosis.
7) D. Cytosis.
8) D. Persamaan Goldman-Hodgkin-Katz.
9) A. Difusi.
10) B. Pinositosis.

Tes Formatif 3

1) C (2), (3), dan (4), karena pernyataan (1) terbalik
2) A. Untuk mencegah kristalisasi rantai-rantai asam lemak dengan menyusup di antara sel.
3) B. Respirasi sel.
4) D. Klorofil, mitokondria, dan sel.
5) B. Kerja transpor.
6) B. (1), (3), dan (4).
7) D. ATP juga $NADPH_2$.
8) A. Analitik.
9) C. Glikolisis.
10) B. Pembentukan glukosa dari molekul asam piruvat.

Daftar Pustaka

Dennis Kunkel. 2004. *http://rabi.phvs.virainia.edu/HTW/book.html.* www.Cellsbio.com

Freeman. 2004. *The Science of Biology*, 4th Edition, by Sinauer Associates (www.sinauer.com) and (www.whfreeman.com).

Hughes, William. 1979. *Aspect of Biophysics*. Canada: John & Sons, Inc.

Lubert, Styer. 2000. *Biokomia*. Vol I. Edisi 4. Penerbit Buku Kedokteran EGC. Jakarta.

_____. 2001. *How things work: the physics of everyday life* (2"ed), (Versi Elektronik). httta://rabi.nhys.vireiniaedu/HTW/book.html

http://www.biosci.uga.edu/ahnanac/bio_103/notes/may_15.htm.

http.www.cellsalive.com/cells

_____. 2004. *The Science of Biology*. 4th Edition, by Sinauer Associates (www.sinauer.com)

Ralph Nossal dan Harold Leccar. 1991. *Mollecular & Cell Biophysics*. Canada: Addison-Wesley Publishing Company.