



MEMAHAMI TINGKAT KIMIAWI DAN SELULER FISIOLOGI MANUSIA

Ilhamjaya Patellongi

DOSEN TENAGA KEPERAWATAN FAKULTAS KEDOKTERAN

UNIVERSITAS HASANUDDIN

Ilhamjaya Patellongi

MEMAHAMI TINGKAT KIMIAWI DAN SELULER FISIOLOGI MANUSIA

leutika books



Ilhamjaya Patellongi, lulus pendidikan dokter di Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin tahun 1989. Sejak mahasiswa, terlibat aktif sebagai asisten pada Laboratorium Ilmu Faal Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin, sebelum menjadi staf dosen pada tahun 1990.

Menyelesaikan pendidikan magister Ilmu Kesehatan Olahraga pada Pascasarjana UNAIR Surabaya, pada tahun 1994 dan meraih gelar Doktor di tempat yang sama pada tahun 1999. Saat ini aktif sebagai pengajar Fisiologi Manusia di program studi S1 Kedokteran, Keperawatan dan Fisioterapi Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin. Sebagai ketua komite/prosiding S2 Fisiologi Program Studi Biomedis Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin, sejak tahun 2005.

Pernah menjadi koordinator Mata Kuliah Prinsip-Prinsip Sains untuk Keperawatan, dan sampai saat ini sebagai koordinator Mata Kuliah Biomedis I pada Program Pendidikan Dokter di Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin dan Fakultas Kedokteran yang menjadi binaannya (FK UMI dan FK UNISMU, Makassar; FK Unhali, Pontalena; FK Unudata Kupang, FK dan FK Unisa Palu).

Buku ini membahas tingkat organisasi tubuh manusia, anatomi dan ikatan kimia dari molekul-molekul penyusun sel, aktivitas sel, fungsi masing-masing organ/sel, aktivitas sel, proses oleh sel dan pengawasaan genetik sel serta energi sebagai sumber energi langsung untuk seluruh aktivitas sel.

Alhamdulillah, buku ini diterbitkan untuk pertama kali. Walaupun telah diterbitkan sebelumnya, mungkin agar bisa dibaca oleh pembaca, namun kekurangan akan selalu ada. Oleh karena itu, saran serta kritik guna perbaikannya akan diterima dengan senang hati.

Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya siswa yang memusatkan pembahasannya dalam mempelajari bidang kesehatan. Amin.

Cepsis Center for Policy Analyal

leutika books

Jl. Widyadarmas No. 55, Tanggulang, Yogyakarta, 55244 Telp. (0271) 7511740
e-mail: leutika@leutikabooks.com web: www.leutikabooks.com



Memahami Tingkat Kimiawi dan Seluler Fisiologi Manusia

—Yogyakarta: LeutikaBooks, 2013

viii + 136 Hlm., 14,5x21 cm

Cetakan Pertama, September 2013

Penulis : Bharjaya Patelong
Penyunting : Fatmah Alifanty Gobal
Desain Sampul : Prati's
Tata Letak : MaxAmor

leutika**books**

Halaman diilustrasi oleh undang-undang
Dilarang menyalin atau sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin dari penerbit.

ISBN 978-602-9420-45-6

Dicetak oleh PT Leutika Novawalleta
di di luar tanggung jawab penerbitan.

Kata Pengantar

Fisiologi, secara spesifik, mempelajari bagaimana tubuh manusia bekerja. Fisiologi manusia merupakan mata kuliah yang tidak banyak diminati oleh mahasiswa semenjak penerapan kurikulum pendekatan sistem diterapkan. Waktu yang terbatas untuk mempelajari fisiologi menyebabkan mahasiswa tidak dapat mempelajarinya dengan mendalam dan menyenangkan. Apalagi setelah kimia, fisika, biologi dan matematika ditiadakan, dianggap tidak begitu terkait dengan mata kuliah pada Pendidikan Kedokteran. Padahal, fisiologi tanpa ilmu-ilmu dasar tersebut, menurut hemat penulis tidak mungkin dapat dipahami dengan baik dan tepat.

Buku ini disusun sedemikian rupa sehingga mahasiswa diharapkan dapat memahami dengan baik konsep-konsep kimiawi dan seluler yang akan mendasari pemahaman pada tingkat lebih lanjut, yaitu pada tingkat sistem. Dengan mengintegrasikan konsep-konsep kimiawi ke konsep-konsep seluler, mahasiswa diharapkan memahami bagaimana masing-masing konsep merupakan suatu bagian yang integral dari keseluruhan materi. Amat sering, mahasiswa memandang komponen-komponen fisiologi secara terpisah-pisah. Diperuntukkan untuk mahasiswa kedokteran, keperawatan, fisioterapi, kebidanan, farmasi, psikologi, kesehatan masyarakat dan ilmu kesehatan lainnya.

Pendekatan dan kedalaman yang disajikan dalam buku ini, menurut hemat penulis, sangat cocok untuk mahasiswa S1 pada semester awal (pertama) karena konsep-konsep kimia yang digunakan telah dipelajari selama pendidikan di SMA dan masih segar diingatan mereka.

Ringkasan bab menampilkan poin-poin utama masing-masing bab. Dengan ringkasan ini, mahasiswa dapat mengulang kembali secara

Memahami Tingkat Kimiawi dan Seluler Fisiologi Manusia

—Yogyakarta: LeutikaBooks, 2013

viii + 136 Hal., 14,5x21 cm

Cetakan Pertama, September 2013

Penulis : Bharjaya Patelong
Penyunting : Fatmah Alfaridy Gobal
Desain Sampul : Prati's
Tata Letak : MuzAmwar

leutika**books**

Halaman diilustrasi oleh undang-undang
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin dari penerbit.

ISBN 978-602-9420-45-6

Cetakan oleh PT Leutika Nouvalitera
di di luar tanggung jawab penerbitan.

Kata Pengantar

Fisiologi, secara spesifik, mempelajari bagaimana tubuh manusia bekerja. Fisiologi manusia merupakan mata kuliah yang tidak banyak diminati oleh mahasiswa semenjak penerapan kurikulum pendekatan sistem diterapkan. Waktu yang terbatas untuk mempelajari fisiologi menyebabkan mahasiswa tidak dapat mempelajarinya dengan mendalam dan menyenangkan. Apalagi setelah kimia, fisika, biologi dan matematika ditiadakan, dianggap tidak begitu terkait dengan mata kuliah pada Pendidikan Kedokteran. Padahal, fisiologi tanpa ilmu-ilmu dasar tersebut, menurut hemat penulis tidak mungkin dapat dipahami dengan baik dan tepat.

Buku ini disusun sedemikian rupa sehingga mahasiswa diharapkan dapat memahami dengan baik konsep-konsep kimiawi dan seluler yang akan mendasari pemahaman pada tingkat lebih lanjut, yaitu pada tingkat sistem. Dengan mengintegrasikan konsep-konsep kimiawi ke konsep-konsep seluler, mahasiswa diharapkan memahami bagaimana masing-masing konsep merupakan suatu bagian yang integral dari keseluruhan materi. Amat sering, mahasiswa memandang komponen-komponen fisiologi secara terpisah-pisah. Diperuntukkan untuk mahasiswa kedokteran, keperawatan, fisioterapi, kebidanan, farmasi, psikologi, kesehatan masyarakat dan ilmu kesehatan lainnya.

Pendekatan dan kedalaman yang diuraikan dalam buku ini, menurut hemat penulis, sangat cocok untuk mahasiswa S1 pada semester awal (pertama) karena konsep-konsep kimia yang digunakan telah dipelajari selama pendidikan di SMA dan masih segar diingatan mereka.

Ringkasan bab menampilkan poin-poin utama masing-masing bab. Dengan ringkasan ini, mahasiswa dapat mengulang kembali secara

lebih efisien dengan menggunakan informasi tertulis maupun visual untuk berfokus pada konsep utama sebelum berpindah ke bagian selanjutnya.

Soal latihan di akhir setiap bab berisi beberapa format pertanyaan untuk mahasiswa dalam rangka menguji sendiri kemampuan mereka, dan melatih diri dalam penerapan fakta dan konsep yang disajikan.

Tujuan

Setelah selesai mempelajari buku ini, pembaca/mahasiswa diharapkan akan memahami tingkat kimiawi dan seluler Fisiologi Tubuh Manusia sebagai tahap awal untuk memahami Fisiologi Manusia secara terintegrasi dan menyeluruh untuk selanjutnya menjadi landasan kuat untuk memahami berbagai patomekanisme yang mendasari gangguan kesehatan atau penyakit dan penatalaksanaannya pada berbagai level kompetensi.

Ruang Lingkup

Buku ini membahas tingkat organisasi tubuh manusia, atom/molekul dan ikatan kimia dari molekul-molekul penyusun struktur sel dan aktivitas sel, fungsi masing-masing organel sel, aktivitas sintesis protein oleh sel dan penguasaan genetik sel serta resintesis ATP sebagai sumber energi langsung untuk seluruh aktivitas sel.

Allhamdulillah, buku ini diterbitkan untuk pertama kalinya. Walaupun telah diusahakan semaksimal mungkin agar bermanfaat bagi pembaca, namun kekurangan akan selalu ada. Oleh karena itu saran-saran serta kritik guna perbaikannya akan diterima dengan senang hati.

Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa yang memulai pengembaraannya dan ingin mengabdikan diri di bidang kesehatan. Amin.

Makassar, 17 Agustus 2013

Ibhamjaya Patellongi

Daftar Isi

	Halaman
Kata Pengantar	i
Bab 1 : Pendahuluan	
Sasaran pembelajaran	1
Tingkat kimiawi	3
Tingkat seluler	3
Tingkat jaringan	6
Tingkat organ	8
Tingkat sistem tubuh	9
Tingkat organism	13
Ringkasan	13
Soal latihan	15
Bab 2 : Atom, Ion, Ikatan Kimia dan Molekul dalam Tubuh Manusia	
Sasaran pembelajaran	17
Atom	18
Unsur	19
Molekul	26
Campuran	27
Senyawa	28
Unsur-unsur pembentuk tubuh manusia	29
Ikatan kimia	30
Persamaan kimia	42
Konsep mol	44
Materi	46
Ringkasan	47
Soal latihan	47
Bacaan lebih lanjut	48

Bab III : Biomolekul

Sasaran pembelajaran	49
Senyawa hidrokarbon	49
Molekul organik utama tubuh manusia	53
Karbohidrat	54
Monosakarida	54
Disakarida	56
Polisakarida	57
Lipid	58
Lemak netral	61
Senyawa lipid	64
Turunan lipid	64
Protein	72
Asam amino	73
Struktur protein	74
Enzim	76
Pencernaan dan absorpsi molekul	80
Ringkasan	83
Soal latihan	84
Bacaan lebih lanjut	85

Bab IV – Struktur Sel, Organel dan Fungsinya

Sasaran pembelajaran	86
Mikroskop dan sel	86
Jenis sel	87
Sel tubuh manusia	90
Membran plasma	91
Nukleus	94
Nukleolus	96
Sitoplasma	97
Sitoskeleton	98

Ribosom	99
Artikulasi endoplasma	101
Badan golgi	102
Lisosom	103
Mitokondria	107
Vakuol	111
Ringkasan	112
Soal latihan	114
Bacaan lebih lanjut	115

Bab V : Pengawasan Genetik Fungsi Sel

Sasaran pembelajaran	116
Sintesis protein	116
Gen	117
Benkas dasar pembentuk DNA	118
Kode genetik	119
Proses transkripsi	122
Proses translasi	128
Pengawasan fungsi genetik dan aktivitas biokimia sel	131
Pengaturan genetik	131
Pengawasan enzim	133
Pertumbuhan dan pembelahan sel	134
Pembelahan sel	134
Sel dan sel	137
Pengawasan pertumbuhan dan pembiakan sel	145
Kanker	146
Sel punca (stem cell)	146
Ringkasan	149
Soal latihan	151
Bacaan lebih lanjut	152

Bab VI: ATP dan Fosforilasi Oksidatif

Sasaran pembelajaran	153
Sintesis ATP	154
Satuan energi	156
Nutrisi	157
Metabolisme	157
Reaksi respirasi seluler	158
Jalur metabolisme	159
Metabolisme karbohidrat	159
Metabolisme lemak	167
Metabolisme protein	171
Pengeluaran energi	172
Ringkasan	174
Soal latihan	175
Bacaan lebih lanjut	176

BAB I

Pendahuluan

Sasaran Pembelajaran

Pada akhir bab ini pembaca akan mampu untuk:

1. Menyebutkan berbagai tingkat organisasi tubuh manusia;
2. Menyebutkan dan menjelaskan fungsi dasar setiap sel dalam tubuh manusia;
3. Menyebutkan dan menjelaskan berbagai jenis jaringan dalam tubuh manusia dan fungsinya;
4. Menyebutkan berbagai jenis organ tubuh manusia;
5. Menyebutkan dan menjelaskan berbagai sistem dalam tubuh manusia dan fungsinya.

Setiap manusia yang hidup pasti memiliki rasa ingin tahu tentang alam semesta dan dirinya. Untuk memahami segala aspek dari tubuh manusia, pendekatan yang sering dilakukan oleh sebagian besar ilmuwan, khususnya ahli fisiologi melihat tubuh manusia sebagai mesin hidup sebagaimana dalam fenomena mesin dalam ilmu alam lainnya. Konsekuensinya adalah semua fenomena kehidupan tubuh manusia tersebut harus dapat dijelaskan secara logis dalam suatu rangkaian sebab-akibat melalui proses fisika dan kimiawi, sebab tubuh manusia, bagaimanapun juga adalah suatu materi yang tersusun dari bahan-bahan kimiawi yang menyusun sel-sel. Pendekatan ini biasanya dibagi menjadi dua bagian, yaitu: pendekatan mekanistik dan pendekatan teleologis. Pendekatan mekanistik menekankan bagaimana suatu fenomena dalam tubuh dapat terjadi, sedangkan pendekatan teleologis menekankan

mengapa fenomena tersebut terjadi, dan apa tujuannya. Misalnya, mengapa kita menggigil ketika kita kedinginan. Berdasarkan pendekatan teleologinya, adalah untuk menghangatkan tubuh. Sedangkan pendekatan mekanistiknya menjelaskan bahwa pada saat kedinginan, sel-sel peka suhu dalam tubuh mendeteksi penurunan suhu tubuh yang terjadi. Selanjutnya, sel-sel ini mengirim sinyal ke hipotalamus, di pusat pengatur suhu tubuh. Sebagai jawabannya, hipotalamus mengaktifkan jalur-jalur saraf yang pada akhirnya mengakibatkan otot-otot rangka secara involunter berkontraksi secara berulang-ulang, yang kita ketahui sebagai fenomena menggigil. Oleh karena itu untuk memahami tubuh manusia sebagaimana yang diharapkan oleh kedua pendekatan di atas, maka perlu memahami terlebih dahulu mengenai tingkat organisasi dalam tubuh manusia. Sebagaimana mesin, mesin tubuh manusia hanya berfungsi bila semua komponen-komponennya tersusun dengan benar.

Tingkat Organisasi dalam Tubuh Manusia

Secara struktural, ada 6 tingkat organisasi dalam tubuh manusia, yaitu: (1) tingkat kimiawi, (2) tingkat seluler, (3) tingkat jaringan, (4) tingkat organ, (5) tingkat sistem tubuh, dan (6) tingkat organisme (tubuh secara keseluruhan).

Tingkat Kimiawi (Chemical Level)

Tubuh manusia merupakan kombinasi berbagai bahan-bahan kimiawi yang khas, dimana atom-atom, molekul-molekul dan senyawa-senyawa kimia yang terbentuk menjadi bahan-bahan dasar dari sel, dimana sel sebagai unit terkecil dari kehidupan. Semua makhluk hidup merupakan gabungan dari atom-atom. Manusia, walaupun sangat kompleks dan terorganisir, tetaplah kombinasi atom-atom. Oleh karena itu, pemahaman tentang tubuh manusia, khususnya fungsinya, haruslah sejalan dengan pemahaman tentang atom.

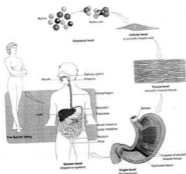
Atom-atom yang banyak ditemukan dalam tubuh manusia antara lain: oksigen, karbon, hydrogen, dan nitrogen. Diperkirakan atom-atom tersebut di atas menyumbang 96% dari total zat-zat kimia di dalam tubuh manusia. Molekul-molekul kehidupan, misalnya protein, karbohidrat, lemak dan asam nukleat merupakan molekul-molekul yang komponen utamanya dari atom-atom tersebut di atas. Berbagai atom dan molekul yang dibentuknya adalah bahan mentah yang menjadi asal dari semua makhluk hidup, termasuk manusia.

Tingkat Seluler (Cellular Level)

Sel merupakan unit terkecil dan mendasar dari kehidupan. Sel merupakan pondasi bagi semua makhluk hidup. Sel adalah unit terkecil yang masih dapat menjalankan proses yang berhubungan dengan kehidupan. Bakteri dan amuba, merupakan entitas kehidupan yang independen yang disebut organisme, bagaimanapun sederhananya, bersel tunggal sehingga disebut organisme uniseluler. Sebab, mampu melakukan proses-proses yang berkaitan dengan kehidupan. Sekali lagi, sel adalah satuan dasar atau struktur fundamental dari kehidupan.

Pada bentuk-bentuk organisme multiseluler yang sederhana, misalnya trumbu karang, selnya mirip satu dengan lainnya. Pada organisme multiseluler yang kompleks, misalnya manusia, memiliki banyak jenis sel. Tubuh manusia dewasa merupakan kumpulan dan kesatuan lebih 75 triliun sel. Selain mempunyai jumlah sel yang banyak, memiliki banyak jenis sel. Misalnya, sel otot, sel saraf, sel epitel dan sel lainnya.

Tidak seperti sel pada organisme multiseluler yang sederhana, sel manusia tidak hanya mengalami multiplikasi, tetapi juga berdiferensiasi atau menjadi sel khusus untuk menjalankan fungsi tertentu. Akibatnya, tubuh manusia memiliki beragam jenis sel.



Gambar 1.1 Tingkat Organisasi Tubuh Manusia

(Disalin dari Ross and Wilson, 2004 p.5)

Fungsi sel tubuh manusia

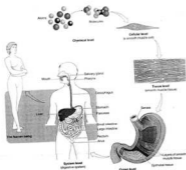
Fungsi dasar. Adapun fungsi dasar yang dijalankan oleh sel antara lain:

- Memperoleh nutrisi (zat gizi) dan oksigen (O_2) dari lingkungan yang mengelilingi sel;
- Menjalankan berbagai reaksi kimia yang menggunakan zat gizi dan O_2 untuk menghasilkan energi bagi kebutuhan sel;
- Mengekuarkan karbondioksida (CO_2) dan zat-zat sisa atau produk sampingan yang dihasilkan oleh berbagai reaksi kimia tersebut di atas;

- Mensintesis protein dan komponen lain yang diperlukan untuk membentuk struktur sel, pertumbuhan sel dan untuk menjalankan fungsi tertentu dalam sel;
- Merespon secara cepat perubahan yang terjadi di lingkungan sekitar sel;
- Mengontrol pertukaran berbagai zat antara sel dan lingkungan sekitarnya;
- Memindahkan berbagai zat dari salah satu bagian sel ke bagian lainnya, ketika menjalankan aktivitasnya. Bahkan ada sebagian sel dapat menggerakkan seluruh dirinya melintasi lingkungannya; dan
- Berreproduksi. Pada umumnya sel dapat berreproduksi, hanya ada beberapa sel tubuh, misalnya sel saraf dan sel otot, telah kehilangan kemampuan untuk berreproduksi setelah terbentuk pada tahap awal perkembangan. Apabila sel-sel ini rusak akibat trauma atau proses penyakit, mereka sulit digantikan.

Fungsi khusus. Semua sel memiliki karakteristik yang hampir sama, akan tetapi pada organisme multiseluler, terdapat sel khusus, yang bekerja selain melakukan fungsi dasarnya juga melakukan suatu fungsi khusus, yang biasanya merupakan modifikasi atau perluasan dari salah satu fungsi dasar tersebut di atas. Adapun sel khusus dengan fungsi khusus tersebut adalah sebagai berikut:

- Sel kelenjar; misalnya sel kelenjar sistem pencernaan mengsekresikan enzim-enzim pencernaan, yang semuanya adalah protein. Rupanya sel kelenjar tersebut memanfaatkan kemampuannya mensintesis protein.
- Sel saraf (neuron); memanfaatkan kemampuan dasar sel untuk merespon perubahan yang terjadi di lingkungan sekitarnya. Sel saraf membentuk dan menyalurkan impuls listrik untuk menyampaikan informasi mengenai perubahan-perubahan yang menyebabkan sel saraf berespon ke bagian tubuh lainnya di dalam tubuh.



Gambar 1.1 Tingkat Organisasi Tubuh Manusia

(Disalin dari Ross and Wilson, 2004 p.3)

Fungsi sel tubuh manusia

Fungsi dasar. Adapun fungsi dasar yang dijalankan oleh sel antara lain:

- Memperoleh nutrisi (zat gizi) dan oksigen (O_2) dari lingkungan yang mengelilingi sel;
- Menjalankan berbagai reaksi kimia yang menggunakan zat gizi dan O_2 untuk menghasilkan energi bagi kebutuhan sel;
- Mengeluarkan karbon dioksida (CO_2) dan zat-zat sisa atau produk sampingan yang dihasilkan oleh berbagai reaksi kimia tersebut di atas;

- Mensintesis protein dan komponen lain yang diperlukan untuk membentuk struktur sel, pertumbuhan sel dan untuk menjalankan fungsi tertentu dalam sel;
- Merespon secara cepat perubahan yang terjadi di lingkungan sekitar sel;
- Mengontrol pertukaran berbagai zat antara sel dan lingkungan sekitarnya;
- Memindahkan berbagai zat dari salah satu bagian sel ke bagian lainnya, ketika menjalankan aktivitasnya. Bahkan ada sebagian sel dapat menggerakkan seluruh dirinya melintasi lingkungannya; dan
- Berproduksi. Pada umumnya sel dapat berproduksi, hanya ada beberapa sel tubuh, misalnya sel saraf dan sel otot, telah kehilangan kemampuan untuk berproduksi setelah terbentuk pada tahap awal perkembangan. Apabila sel-sel ini rusak akibat trauma atau proses penyakit, mereka sulit digantikan.

Fungsi khusus. Semua sel memiliki karakteristik yang hampir sama, akan tetapi pada organisme multiseluler, terdapat sel khusus, yang bekerja selain melakukan fungsi dasarnya juga melakukan suatu fungsi khusus, yang biasanya merupakan modifikasi atau perluasan dari salah satu fungsi dasar tersebut di atas. Adapun sel khusus dengan fungsi khusus tersebut adalah sebagai berikut:

- Sel kelenjar; misalnya sel kelenjar sistem pencernaan mengsekresikan enzim-enzim pencernaan, yang semuanya adalah protein. Rupanya sel kelenjar tersebut memanfaatkan kemampuannya mensintesis protein.
- Sel saraf (neuron); memanfaatkan kemampuan dasar sel untuk merespon perubahan yang terjadi di lingkungan sekitarnya. Sel saraf membentuk dan menyalurkan impuls listrik untuk menyampaikan informasi mengenai perubahan-perubahan yang menyebabkan sel saraf merespon ke bagian tubuh lainnya di dalam tubuh.

- c. Sel ginjal (nephron); memanfaatkan kemampuan dasar sel untuk menahan zat tertentu yang dibutuhkan oleh tubuh secara selektif, sekaligus mengeluarkan berbagai zat yang tidak dibutuhkan, melalui urin dalam rangka mengontrol pertukaran berbagai zat antara sel dan lingkungan sekitarnya.
- d. Sel otot (muscle cell); memanfaatkan kemampuan dasar sel untuk menghasilkan gerakan gerakan intrasel. Kontraksi otot melibatkan gerakan selektif berbagai struktur internal agar sel otot memendek.

Tingkat Jaringan (Tissue Level)

Sel-sel yang memiliki struktur dan fungsi yang sama menyusun diri menjadi jaringan. Jadi, jaringan adalah sekelompok sel dengan spesialisasi yang serupa. Tubuh manusia terdiri dari 4 jaringan, yaitu: (a) jaringan otot, (b) jaringan saraf, (c) jaringan epitel, dan (d) jaringan ikat. Kata jaringan kadang juga dipakai dalam pengertian yang berbeda dengan pengertian jaringan tersebut di atas. Misalnya, jaringan paru dan jaringan hati; disini jaringan diartikan sebagai kumpulan berbagai komponen sel dan ekstrasel yang membentuk organ tertentu.

Jaringan Otot. Jaringan ini disusun oleh sel-sel yang khusus, yang mempunyai kemampuan untuk berkontraksi dan menghasilkan gaya. Ditemukan 3 jenis jaringan otot, yaitu: otot rangka yang bertugas menggerakkan tulang-belulang, otot jantung yang bertanggung jawab memompa darah ke seluruh jaringan tubuh, otot polos yang bertanggung jawab mengontrol gerakan pegisian atau pengosongan berbagai organ dan saluran berongga, misalnya gerakan makanan dalam saluran pencernaan.

Jaringan Saraf. Jaringan ini disusun oleh sel-sel saraf yang berfungsi khusus untuk menyebarkan impuls listrik, yang kadang-kadang menempuh jarak yang jauh. Impuls listrik ini berfungsi sebagai sinyal untuk menyampaikan informasi dari satu bagian tubuh ke bagian tubuh lainnya.

Jaringan Epitel. Jaringan ini disusun oleh sel-sel yang berfungsi khusus untuk mempertahankan berbagai zat antara sel dengan lingkungan sel. Dibagi 2 berdasarkan strukturnya, yaitu: lapisan epitel dan kelenjar sekretorik. Secara umum, lapisan epitel ini berfungsi sebagai pembatas yang memisahkan tubuh dari lingkungan eksternal, misalnya lapisan luar kulit dan dari isi rongga yang berhubungan dengan lingkungan luar, misalnya lumen saluran cerna. Hanya zat tertentu yang dapat dipindahkan antara kompartemen yang dipisahkan oleh suatu sawar jaringan epitel. Jenis dan luasnya pertukaran tersebut bervariasi tergantung pada lokasi dan fungsi jaringan epitel. Sebagai contoh, hanya sedikit zat yang dapat dipertukarkan antara tubuh dan lingkungan eksternal yang menembus kulit; sedangkan sel epitel yang melapisi saluran pencernaan memiliki fungsi khusus absorpsi zat-zat gizi, akan melewatkan atau mempertukarkan banyak zat yang melintasi jaringan epitel tersebut.

Kelenjar adalah jaringan epitel yang berfungsi khusus untuk mengsekresi produk-produk spesifik (yang sebagian besar disintesis oleh sel yang bersangkutan) dari sebuah sel kelenjar sebagai respon terhadap rangsangan yang sesuai. Dikenal 2 jenis kelenjar, yaitu: kelenjar eksokrin dan endokrin. Kelenjar eksokrin mengeluarkan produknya melalui saluran ke bagian luar tubuh (atau ke dalam suatu rongga yang berhubungan dengan dunia luar). Misalnya, kelenjar keringat dan berbagai kelenjar yang mengeluarkan getah-getah pencernaan. Kelenjar endokrin tidak memiliki saluran dan mengeluarkan produk-produknya (hormon) ke dalam darah. Misalnya, kelenjar paratiroid mengeluarkan hormon paratiroid yang kemudian diangkut oleh darah menuju tempat kerjanya, yaitu di tulang dan ginjal.

Jaringan Ikat. Jaringan ikat berfungsi sebagai penghubung, pemunjang, dan perekat berbagai bagian tubuh. Jaringan ini memiliki sel dalam jumlah tertentu (sedikit) yang terbenam di dalam bahan ekstrasel. Jaringan ini mencakup beberapa struktur, misalnya jaringan ikat longgar yang melekatkan jaringan epitel ke struktur di bawahnya. Tendon,

merupakan jaringan ikat yang melekatkan otot rangka dengan tulang. Tulang merupakan jaringan ikat yang memberi bentuk, menyokong, dan melindungi tubuh. Darah merupakan jaringan ikat yang mengangkut bahan-bahan dari satu bagian tubuh ke bagian tubuh lainnya. Kecuali darah, sel-sel yang membentuk suatu jaringan ikat menghasilkan molekul-molekul spesifik yang mereka keluarkan ke ruang ekstrasel di antara sel-sel tersebut. Salah satu diantaranya adalah elastin, yang memungkinkan peregangan dan penyusutan kembali berbagai struktur organ tubuh seperti paru-paru. Selama proses bernapas, elastin memungkinkan paru mengembang dan mengempis.

Tingkat Organ (Organ Level)

Organ dibentuk dari dua atau lebih jaringan primer, yang tersusun sedemikian rupa untuk melaksanakan fungsi tertentu. Misalnya, lambung merupakan organ yang tersusun dari 4 jenis jaringan primer. Jaringan yang membentuk lambung secara kolektif berfungsi untuk menyimpan makanan yang masuk dan menyalurkan ke saluran pencernaan berikutnya, serta untuk memulai pencernaan. Lambung dilapisi jaringan epitel yang membatasi pemindahan berbagai zat kimia pencernaan dan makanan yang belum dicerna dari lumen lambung ke dalam darah. Sel-sel kelenjar dari epitel di lambung mencakup sel-sel eksokrin, yang mengeluarkan getah pencerna protein ke dalam lumen, dan sel-sel endokrin yang mengeluarkan suatu hormon yang membantu mengatur sekresi eksokrin lambung dan kontraksi otot. Dinding lambung terdiri dari jaringan otot polos yang kontraksinya menyebabkan makanan yang masuk bercampur dengan getah pencernaan dan mendorong kearah usus. Di dalam dinding lambung juga terdapat jaringan saraf, bersama dengan hormon, mengontrol kontraksi otot dan sekresi kelenjar. Berbagai jaringan primer tersebut disatukan oleh jaringan ikat membentuk organ lambung.

Tingkat Sistem (System Level)

Setiap sistem dalam tubuh kita, merupakan kumpulan organ-organ yang melakukan fungsi yang saling berkaitan dan berinteraksi untuk menyelesaikan suatu aktifitas bersama, yang memegang peranan penting untuk kelangsungan hidup individu secara keseluruhan. Misalnya, mulut, faring, esofagus, lambung, usus halus, usus besar, anus, kelenjar liur, pankreas, hati, dan kandung empedu bersama-sama dan menyatukan diri membentuk sistem pencernaan. Organ-organ pencernaan ini bekerjasama untuk menuntaskan penguraian makanan menjadi molekul-molekul nutrisi yang kecil untuk dapat diserap ke dalam darah. Tubuh manusia mempunyai kurang lebih 11 sistem; yaitu: sistem pernapasan, sistem peredaran darah, sistem pencernaan, sistem rangka, sistem otot, sistem saraf, sistem endokrin, sistem kemih, sistem imun (pertahanan tubuh), dan sistem reproduksi.

Sistem Peredaran Darah. Dibentuk oleh jantung, pembuluh darah (arteri dan vena besar, sedang, kecil serta kapiler dalam mikrosirkulasi) dan darah. Berfungsi memompa darah ke seluruh jaringan tubuh dalam rangka menyediakan oksigen dan nutrisi ke seluruh organ dan jaringan dan membuang zat sisa dan ampas metabolisme dari jaringan. Selain itu, juga mengantarkan zat lainnya, seperti elektrolit, hormon dan sel imun dari satu bagian tubuh ke bagian tubuh lainnya.

Sistem Pernapasan. Dibentuk oleh hidung, saluran udara lain di tenggorak, tenggorakan (faring), trakea, bronkus dan bronkiolus, paru-paru, diafragma dan otot-otot pernapasan lainnya. Berfungsi membawa udara masuk dan keluar paru untuk selanjutnya dibawa ke dalam rongga alveoli paru untuk memfasilitasi terjadinya pertukaran oksigen dan karbondioksida antara kapiler yang mengelilingi alveoli dan udara dalam rongga alveoli. Oksigen berdifusi masuk ke dalam kapiler dari karbondioksida berdifusi ke udara rongga alveoli. Jadi, mengambil oksigen dari lingkungan eksternal dan mengeluarkan karbondioksida ke lingkungan eksternal. Selain itu, sistem pernapasan juga ikut berperan

dalam mempertahankan pH lingkungan internal agar optimal bagi kehidupan sel dengan cara mengatur pengeluaran karbondioksida pembentuk asam bikarbonat. Selain itu, sistem pemapasan juga berfungsi untuk vokalisasi.

Sistem Pencernaan. Dibentuk oleh mulut, tenggorokan (faring), esofagus, lambung, pankreas, hati, kandung empedu, usus halus (duodenum, jejunum dan ileum), usus besar (kolon, usus buntu, dan rektum) dan anus. Memiliki berbagai fungsi yang kompleks. Memotong dan mengunyah makanan menjadi molekul-molekul kecil, menyimpan dan mencernanya, membuang bahan sisa, dan mengalirkan zat gizi ke kelenjar hati melalui plasma, untuk selanjutnya didistribusi dan digunakan oleh seluruh jaringan tubuh. Sistem ini juga, memindahkan air dan elektrolit dari lingkungan eksternal ke lingkungan internal. Mengeluarkan sisa-sisa makanan yang tidak dicerna ke lingkungan eksternal melalui tinja.

Sistem Kemih. Dibentuk oleh ginjal, ureter, kandung kemih dan uretra. Berfungsi membentuk urin untuk membuang bahan-bahan sisa dan zat yang berlebih dari darah. Juga berfungsi menjaga keseimbangan air, elektrolit dan pH cairan tubuh.

Sistem Rangka. Terdiri dari kerangka aksial (tengkorak, tulang belakang, tulang rusuk, tulang dada), dan kerangka apendikular (tulang tungkai, tulang bahu, tulang lengan, dan tulang panggul), tulang rawan, sendi serta ligament. Mempunyai struktur padat yang dapat bergerak dan menyangga tubuh. Tulang kerangka bersama otot rangka bekerja sebagai sistem pengungkit dan sebagai tumpuan untuk dapat bergerak serta memungkinkan untuk timbulnya gerakan tubuh. Tulang juga berperan pada sistem lainnya, misalnya untuk pembentukan sel-sel darah. Juga menyimpan mineral yang dibutuhkan tubuh, yang sewaktu-waktu dapat diambil bila tubuh memerlukannya, misalnya kalsium. Kalsium diambil dari tulang bila kalsium yang dibutuhkan tubuh tidak dicukupi dari input kalsium atau kebutuhan kalsium tubuh meningkat, misalnya untuk kerja sel saraf. Biasanya kadar kalsium di dalam darah harus dipertahankan

dalam rentang yang sangat sempit.

Sistem Otot. Termasuk otot rangka, otot halus dan otot jantung. Khususnya otot rangka (otot sadar) digunakan untuk menggerakkan tulang-tulang yang membentuk persendian satu sama lain. Sistem ini memungkinkan individu mendekati makanan dan menjauh dari bahaya. Karena berada di bawah kontrol kesadaran, individu mampu menggunakan otot rangka untuk melakukan bermacam-macam gerakan, sesuai keinginannya. Gerakan-gerakan tersebut, berupa keterampilan motorik halus hingga gerakan-gerakan motorik kuat yang diperlukan untuk mengangkat beban. Selain itu, panas yang dihasilkan saat otot berkontraksi penting untuk memproduksi panas dalam rangka mempertahankan suhu tubuh. Otot tak sadar (otot polos dan otot jantung) bekerja secara otomatis untuk mengendalikan proses dalam tubuh, seperti distribusi darah dan pencernaan.

Sistem Saraf. Terdiri dari otak, sumsum tulang belakang, saraf tepi dan indra. Sistem saraf dan endokrin secara bersama-sama mengontrol aktivitas tubuh. Secara umum, sistem saraf, mengontrol dan mengkoordinasikan aktivitas tubuh yang memerlukan respon cepat dan segera (akut). Sistem ini sangat penting, terutama untuk mendeteksi dan memunculkan reaksi terhadap berbagai perubahan di lingkungan internal. Selain itu, sistem ini bertanggung jawab atas fungsi lain yang lebih tinggi yang tidak seluruhnya ditujukan untuk mempertahankan homeostasis, misalnya kesadaran, ingatan dan kreativitas. Otak (terutama koreteks serebri) adalah pusat kesadaran. Melalui medulla spinalis dan saraf perifer spinalis, otak mengendalikan seluruh gerakan tubuh dengan luasan motoriknya. Otak juga menerima rangsangan dari luar dan dalam tubuh. Ada banyak aktivitas dari detik ke detik dari otak dikerjakan secara tak sadar bersama dengan sistem endokrin untuk menjaga sistem tubuh lainnya, yaitu untuk mempertahankan homeostasis.

Sistem Endokrin. Terdiri dari semua jaringan penghasil hormon termasuk hipotalamus, hipofisis, tiroid, adrenal, pancreas endokrin, paratiroid,

gonad, ginjal, usus, jantung, timus, pineal dan kulit. Merupakan sistem kontrol utama lainnya, bersama dengan sistem saraf. Sistem endokrin mengatur aktivitas yang lebih memertingkan daya tahan (jangka panjang, kronis) dari pada kecepatan (akut). Misalnya, pertumbuhan, perubahan saat pubertas, dan aktivitas reproduksi. Sistem endokrin bekerja sama dengan ginjal untuk mengatur atau mengontrol konsentrasi berbagai zat gizi, volume cairan dan komposisi elektrolit lingkungan internal. Sistem endokrin ini berhubungan langsung dengan sistem saraf melalui otak, sehingga dapat mengawasi dan mengendalikan seluruh sistem tubuh lainnya.

Sistem Amfotik dan imun. Terdiri dari sel darah putih (limfosit), limpa, antibodi, tonsil dan adenoid, kelenjar timus, cairan limfa, kelenjar limfa, dan pembuluh limfa. Sistem imun (kekebalan tubuh) berfungsi melindungi tubuh dari berbagai ancaman, seperti penyakit infeksi atau benda asing dan berbagai gangguan proses dalam tubuh (misalnya, melindungi sel-sel tubuh lainnya dari sel tubuh yang telah menjadi kanker). Cairan limfa, selain membawa zat gizi dan membuang bahan sisa, juga membawa sel darah putih berisi antibodi bila diperlukan.

Sistem Integumen. Terdiri dari kulit, rambut dan kuku. Berfungsi sebagai sawar protektif bagian luar yang mencegah cairan internal keluar dari tubuh dan mencegah mikroorganisme atau benda asing masuk ke dalam tubuh. Juga melindungi tubuh dari bahaya radiasi. Sistem ini juga terlibat dalam pengaturan suhu tubuh melalui pengaturan jumlah keringat. Lapisan lemak bawah kulit juga dapat berfungsi sebagai insulator, penyimpanan energi, dan peredam kejut.

Sistem Reproduksi. Pada pria terdiri dari testis, saluran sperma, vesikula seminalis, uretra dan penis, serta kelenjar prostat dan bulbourethralis. Pada wanita, terdiri dari ovarium, tuba falopi, uterus, payudara, vagina dan gemitika eksterna. Produksi sperma pada pria bersifat terus menerus, sedangkan produksi sel ovum matang pada wanita berupa sebuah siklus. Walaupun sistem ini tidak esensial bagi homeostasis,

sehingga tidak penting bagi kelangsungan hidup individu, tetapi penting untuk kelangsungan hidup suatu spesies. Berbeda dengan sistem tubuh lainnya, hanya bekerja pada separuh usia manusia dan dapat diangkat melalui operasi tanpa mengancam jiwa.

Tingkat Organisme (Organism Level)

Tingkat ini merupakan tingkat individu yang independen. Terdiri dari berbagai sistem organ yang secara struktural dan fungsional menyatu sebagai entitas yang terpisah dari lingkungan eksternal. Dengan kata lain, tubuh manusia sebagai individu, terdiri dari sel-sel hidup yang terorganisasi menjadi jaringan, lalu menjadi organ kemudian menjadi sistem-sistem yang menyatu dan terpadu untuk mengadaptasi lingkungan eksternal dimana dia berada sepanjang hidupnya.

Ringkasan

1. Tubuh manusia merupakan masyarakat sel-sel hidup yang saling berinteraksi satu-sama lain dan mengorganisasi diri dalam berbagai lingkungan, yaitu: tingkat kimiawi, tingkat sel, tingkat jaringan, tingkat organ, tingkat sistem dan tingkat organisme (individu).
2. Tubuh manusia adalah kombinasi kompleks atom-atom dan molekul-molekul spesifik.
3. Komponen-komponen kimiawi tak hidup ini tersusun secara tepat membentuk sel, entitas kecil yang mampu melaksanakan proses-proses yang berkaitan dengan kehidupan. Sel adalah building blocks struktural dan fungsional dasar yang hidup bagi tubuh.
4. Setiap sel dalam tubuh manusia, selain melaksanakan fungsi-fungsi khusus, juga tetap melaksanakan fungsi dasar sel yang penting bagi kelangsungan hidupnya sendiri, yaitu: berreaksi terhadap perubahan lingkungan sekitarnya; mengontrol perpindahan bermacam-macam bahan di dalam sel dan antar sel dengan lingkungannya; dan berproduksi.

- Kombinasi sel-sel yang memiliki struktur dan fungsi khusus serupa membentuk jaringan. Dalam tubuh manusia dikenal 4 jenis jaringan utama tubuh, yaitu: jaringan otot, jaringan saraf, jaringan epitel dan jaringan ikat. Jaringan otot mengkhususkan diri untuk berkontraksi dan menghasilkan gaya. Jaringan saraf mengkhususkan diri untuk inisiasi dan transmisi impuls listrik. Jaringan epitel mengkhususkan diri untuk melapisi dan membungkus berbagai permukaan dan rongga tubuh dan juga membentuk kelenjar sekretorik. Jaringan ikat mengkhususkan diri untuk menghubungkan, menyokong, dan melekatkan berbagai bagian tubuh.
- Organ tubuh manusia adalah suatu unit kerja yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih jaringan primer untuk bekerjasama melakukan satu fungsi atau lebih. Terdapat banyak organ di dalam tubuh manusia. Contohnya: jantung, lambung, hati, paru-paru dan sebagainya.
- Sistem tubuh manusia adalah kumpulan organ-organ terkait untuk melakukan fungsi tertentu dan saling berinteraksi satu sama lain untuk melaksanakan suatu aktivitas umum yang esensial bagi kelangsungan hidup tubuh secara keseluruhan. Ada 11 sistem dalam tubuh manusia yang berinteraksi dan bekerjasama satu sama lain, yaitu: sistem peredaran darah, respirasi, pencernaan, komi, rangka, otot, saraf, endokrin, imun, integument dan reproduksi. Sistem reproduksi, sedikit berbeda dengan sistem tubuh lainnya, tidak esensial bagi homeostatis sehingga tidak begitu penting untuk kelangsungan hidup individu, tapi penting untuk kelangsungan hidup spesies.
- Sistem-sistem organ berpadu untuk membentuk organism, atau tubuh keseluruhan.

Soal Latihan

- Spesialisasi sel biasanya adalah modifikasi atau elaborasi dari salah satu fungsi dasar sel (Benar atau Salah?)
- Kata jaringan dapat digunakan untuk salah satu dari empat tipe jaringan primer atau untuk agregasi komponen sel dan ekstrasel organ tertentu (Benar atau Salah?)
- Sel pada suatu organisme multiseluler mengalami spesialisasi sampai ke tingkat sel tersebut menjadi sangat berbeda dengan dari organisme bersel tunggal (Benar atau Salah?)
- Keempat tipe utama jaringan adalah: (1) ..., (2) ..., (3) ... dan (4) ...
- Kata ... merujuk kepada pengeluaran produk spesifik, yang sebagian besar disintesis oleh sel sebagai respon terhadap stimulasi yang sesuai.
- Sistem endokrin bekerja sama dengan ... untuk mengatur atau mengontrol konsentrasi berbagai zat gizi, volume cairan dan komposisi elektrolit lingkungan internal.
- Manakah dari aktivitas berikut yang tidak dilaksanakan oleh setiap sel di tubuh?
 - Memperoleh O_2 dan nutrient
 - Melakukan reaksi kimia untuk memperoleh energi yang digunakan oleh sel.
 - Mengeluarkan zat sisa
 - Mengontrol sebagian besar pertukaran bahan antara sel dan lingkungan eksternal.
 - Berproduksi.
- Manakah dari yang berikut bukan merupakan jenis jaringan ikat?
 - Tulang
 - Darah
 - Medulla spinalis
 - Tendon
 - Jaringan yang melekatkan jaringan epitel ke struktur di bawahnya

9. Manakah dari yang berikut adalah susunan peningkatan tingkat organisasi tubuh yang BENAR?
- Kimia, sel, organ, jaringan, sistem tubuh, tubuh keseluruhan.
 - Kimia, sel, jaringan, organ, sistem tubuh, tubuh keseluruhan.
 - Sel, kimia, jaringan, organ, tubuh keseluruhan, sistem tubuh.
 - Sel, kimia, organ, jaringan, tubuh keseluruhan, sistem tubuh.
 - Kimia, sel, jaringan, sistem tubuh, organ, tubuh keseluruhan.
10. Bukan bagian sistem reproduksi pria adalah:
- Testis
 - Epididimis
 - Tuba falopi
 - Vesikula seminalis
 - Prostat

Bacaan Lebih Lanjut

- Anatomy and Physiology* (6th edn). McGraw-Hill Co., 2004. p. 6 – 10.
- For Human Physiology* (8th edn). McGraw-Hill Co., 2003. p. 4 – 21.
- Ross and Wilson. (2001). *Anatomy and Physiology in Health and Illness* (3rd edn). Elsevier, Philadelphia. p. 4 – 15.
- Sherwood, L. (2010). *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA. p. 1- 6.
- Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 3 – 9.

BAB 2

Atom, Ion, Ikatan Kimia dan Molekul dalam Tubuh Manusia

Sasaran Pembelajaran

Pada akhir bab ini pembaca akan mampu untuk:

- Menerangkan struktur atom dan terminologi elektron, proton, dan neutron
- Mendefinisikan istilah unsur, molekul, ion, radikal, senyawa, nomor atom, nomor massa, dan isotop
- Mengebutkan unsur utama yang terkandung dalam tubuh
- Menjelaskan bagaimana ikatan ionik dan kovalen terbentuk
- Membedakan antara molekul polar dan nonpolar
- Menjelaskan konsep mol

Secara umum, sel-sel yang menyusun tubuh manusia mempunyai struktur dasar yang terdiri dari membran sel, protoplasma dan inti sel. Keduanya mempunyai komposisi kimiawi yang terdiri dari air, elektrolit, protein, lemak dan karbohidrat. Semuanya merupakan molekul yang disusun oleh atom-atom yang terbentuk melalui ikatan kimia tertentu. Misalnya, air adalah molekul yang terbentuk dari 3 atom (2 atom hidrogen dan 1 atom oksigen yang terbentuk melalui suatu ikatan kimia tertentu, yaitu ikatan hidrogen).

Struktur dan fungsi tubuh manusia terkait dengan molekul-molekul yang menyusunnya sehingga untuk mempelajari dan memahaminya perlu memahami terlebih dahulu berbagai konsep-konsep dasar dan terminologi ilmu kimia. Oleh karena itu, sebelum mempelajari struktur sel dan fungsinya serta fungsi tubuh manusia lainnya, perlu menegakkan kembali pengetahuan tentang konsep-konsep dasar tersebut.

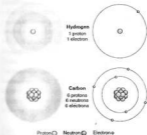
Atom

Seorang filsuf Yunani bernama Democritus, 250 tahun yang lalu, menyatakan bahwa semua zat di alam semesta terbuat dari partikel kecil yang tidak dapat dibagi-bagi lagi, dan selanjutnya John Dalton pada tahun 1807, menyebut partikel kecil ini sebagai atom, sebagaimana kata atomos dari bahasa Yunani, yang artinya tidak terbagi-bagi.

Penemuan mikroskop elektron, mengubah pendapat tersebut karena pengetahuan tentang struktur atom berkembang. Ternyata atom bukan tidak dapat dibagi lagi, bahkan bom nuklir atau bom atom menjadi bukti bahwa atom dapat dipecah. Namun demikian, atom tetap merupakan partikel terkecil yang ada secara bebas dan merupakan satuan terkecil dalam suatu reaksi kimia. Diameter atom berukuran kira-kira $1/100.000.000$ sentimeter; sehingga 100 juta atom yang berdampingan hanya akan berukuran 1 cm.

Struktur Atom

Atom terdiri dari proton, neutron, dan elektron-semuanya disebut juga partikel subatom (Gambar 3.1). Nukleus (inti), terletak di tengah, mengandung proton dan neutron. Massa atom terkonsentrasi pada nukleus dan sangatlah kecil. Elektron bergerak mengitari nukleus. Elektron terletak teratur dalam orbital atau kulit atau tingkat energi dengan jarak yang berbeda dari nukleus (K, L, M dst) dan massanya sangatlah kecil ($1/1840$ dari massa proton) sehingga dapat diabaikan dalam perhitungan reaksi kimia. Pada suatu reaksi kimia, proton dan neutron tidak terlibat, yang terlibat hanya elektron. Atom hidrogen memiliki 1 proton dan 1 neutron pada intinya serta 1 elektron yang bergerak mengelilingi inti pada 1 orbital (kulit K). Atom karbon memiliki 6 proton, 6 neutron dan 6 elektron pada orbitalnya (2 elektron pada kulit K, 4 elektron pada kulit L). Massa neutron sama dengan massa proton. Proton bermuatan positif dan elektron bermuatan negatif. (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Struktur atom Hidrogen dan atom Karbon

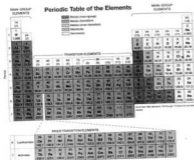
(Diadaptasi dari Fox Human Physiology (8th Edn), McGraw Hill, 2001, p.25)

Unsur

Unsur adalah substansi di mana semua atomnya memiliki sifat kimia yang sama, atau dengan kata lain atom merupakan bagian terkecil dari suatu unsur yang mempertahankan karakteristik kimianya dari unsur tersebut. Dapat juga dikatakan bahwa unsur adalah suatu zat yang tidak dapat diuraikan lagi menjadi zat yang lebih sederhana dengan cara apapun.

Terdapat lebih dari 100 unsur di dunia ini. Ilmuwan Rusia Dmitri Mendeleev telah menyusun unsur-unsur ini kedalam suatu tabel yang disebut tabel periodik (Gambar 2.2). Ia mengatur unsur dalam baris horizontal periode, dan kolom vertikal-golongan. Tabel ini disebut tabel periodik karena penyusunan unsur dilakukan berdasarkan periode, yang ternyata membentuk barisan-barisan. Penggunaan istilah periode

bermula dari fakta bahwa delapan unsur yang membentuk setiap baris dari kedua barisan teratas, misalnya, mengulang beberapa karakteristik dari struktur dan sifat mereka dengan pola yang bersifat periodik. Masing-masing unsur pada barisan memiliki jumlah elektron dalam kulit luarnya yang tepat sama dengan unsur di bagian atasnya, dan bergabung dengan unsur lain pada kolom lain dalam proporsi yang sama. Itulah golongan digunakan untuk menjelaskan unsur yang muncul dalam satu kolom vertikal—yang sama dan ternyata unsur-unsur di dalamnya mempunyai sifat kimia yang sama. Dalam setiap baris juga terlihat pola yang teratur dan tertentu dimana valensi-nya (daya penyatu) unsur cenderung semakin meningkat saat mendekati pusat baris dan menurun menjelang akhir baris.



Gambar 2.2 Tabel Sistem Periodik Unsur-unsur

Klasifikasi Unsur

Setiap unsur dalam tabel periodik direpresentasikan dengan menggunakan simbol. Sebagian besar unsur memiliki dua huruf sebagai simbol sebagai berikut: huruf pertama adalah huruf kapital, dan huruf kedua selalu huruf kecil. Jika hanya terdiri dari satu huruf maka ditulis dengan huruf kapital. Simbol-simbol ini diambil dari nama Inggris (misalnya C untuk carbon) atau bahasa latin (misalnya Na untuk natrium, K untuk kalium). Unsur dapat dibagi menjadi dua kategori umum, yaitu logam dan non logam, berdasarkan sifat masing-masing (Tabel 2.1). Unsur logam ditempatkan pada sisi kiri tabel periodik, misalnya natrium dan kalium, sedangkan unsur non-logam ditempatkan pada sisi kanan, misalnya oksigen dan klorin (Gambar 2.1).

Tabel 2.1 Karakteristik unsur golongan logam dan bukan logam

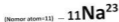
Karakteristik	Logam	Bukan Logam
Kewujudan	Biasanya padat, tetapi mercuri berbentuk cair	Bisa padat, cair atau gas
Penghantar panas atau listrik	Baik	Buruk (insulator yang baik)
Warna oksida	Basa (mengubah lakmus merah menjadi biru)	Asam (membuat lakmus biru menjadi merah)
Kecemerlangan	Mengkilap	Kusam
Sifat dehidri/tekanan tinggi	Tinggi	Rendah
Afiliasi elektron	Donor elektron	Akseptor elektron

Nomor atom dan nomor massa

Nomor atom adalah angka yang menunjukkan jumlah proton yang dimiliki oleh suatu atom. Pada atom netral, nomor atom juga sama dengan jumlah elektron. Unsur-unsur tersusun dalam urutan nomor atom yang semakin meningkat dalam tabel periodik. Nomor massa

adalah jumlah proton ditambah jumlah neutron. Nomor massa selalu lebih besar, sekitar dua kali lipat nomor atom.

(Nomor massa=23)



Gambar 2.3 Nomor Atom dan Nomor Massa

Nomor atom dan nomor massa beberapa unsur penting dapat dilihat pada tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Nomor atom dan nomor massa beberapa unsur penting

Unsur	Simbol	Nomor atom	Nomor Massa	Jumlah proton	Jumlah electron	Jumlah neutron
Hidrogen	H	1	1	1	1	0
Karbon	C	6	12	6	6	6
Oksigen	O	8	16	8	8	8
Natrium	Na	11	23	11	11	12
Kalium	K	19	39	19	19	20
Klor	Cl	17	35	17	17	18

Isotop

Isotop adalah atom dan unsur yang sama yang memiliki nomor atom sama tetapi memiliki nomor massa berbeda. Isotop memiliki jumlah neutron yang berbeda pada nukleusnya. Contohnya Iodin:

	123	125	127	131
	54	54	54	54
proton	54	54	54	54
elektron	54	54	54	54
neutron	69	71	73	77

Isotop memiliki sifat kimia yang sama karena sifat kimia tergantung pada jumlah elektron dalam atom, akan tetapi isotop memiliki beberapa sifat fisik yang berbeda (seperti, titik didih dan titik leleh) karena massa yang berbeda.

Massa atom relatif

Atom dan isotop karbon-12 memiliki massa atom relatif 12,0000 u (u = satuan massa atom). Massa relatif dari atom-atom yang lain didapatkan dengan membandingkan dengan atom standar tersebut. Massa atom relatif disebut juga massa atom, atau massa atom rata-rata, dan di masa lalu disebut berat atom. Massa atom relatif dari suatu unsur adalah massa rata-rata satu atom, dengan menghitung semua isotop dan proporsi relatifnya dibandingkan dengan atom karbon-12. Contoh: massa atom relatif untuk unsur Karbon, Hidrogen, Magnesium, Natrium dan Sulfur dapat dilihat pada tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3 Contoh massa atom relatif beberapa unsur

Unsur	Simbol	Massa atom relatif
Karbon	C	12,011
Hidrogen	H	24,312
Magnesium	Mg	24,312
Natrium	Na	22,989
Sulfur	S	32,064

Susunan Elektron pada Sebuah Atom

Kemampuan atom bergabung dengan berbagai cara menyebabkan besarnya kompleksitas materi dalam tubuh yang memungkinkan struktur sel seperti membran sel, menjadi terbentuk. Impuls listrik dapat dihantarkan di dalam sel saraf dan otot, termasuk otot jantung juga karena kemampuan atom tersebut. Dasar penggabungan

atau pengklatan atom terletak pada susunan elektron dalam sebuah atom.

Elektron dapat dikeluarkan dari suatu atom. Elektron yang terlibat dalam proses tersebut biasanya electron yang menempati kulit terluar atau electron valensi, yang tidak terikat kuat dengan inti. Lintasan (orbital) elektron dapat dianggap sebagai tingkatan energi, yang selanjutnya dibagi menjadi subtingkat energi. Tingkatan energi akan bertambah seiring dengan bertambahnya jarak dari inti. Semakin dekat suatu elektron dengan inti, semakin kecil energi yang dimilikinya dan semakin jauh suatu elektron dari inti, semakin besar energinya. Elektron-elektron dalam unsur tersusun sedemikian rupa sehingga jumlah maksimum elektronnya yang dapat ditampung dalam tiga tingkatan energi tersebut, antara lain: (1) 2 elektron dalam tingkatan energi pertama, 8 elektron dalam tingkatan energi kedua; dan 8 elektron dalam tingkatan energi ketiga. Atom dikatakan berada dalam keadaan dasar jika semua elektronnya berada dalam tingkatan energi yang terendah. Ini berarti semua elektron dalam atom tersebut telah menempati tingkatan energi normal mereka (tanpa adanya lintasan kosong yang lebih dekat ke inti daripada elektron). Misalnya, atom klor memiliki 2 elektron pada kulit K (tingkatan energi pertama), 8 elektron pada kulit L (tingkatan energi kedua) dan 8 elektron pada kulit M (tingkatan energi ketiga).

Elektron suatu unsur dapat menempati tingkatan energi yang lebih tinggi atau lebih rendah dari tingkatan normalnya. Jika suatu elektron menempati setiap tingkatan energi yang lebih tinggi dari tingkatan normalnya, berarti dia dalam keadaan tereksitasi. Elektron dapat naik dari kondisi energi rendah menjadi kondisi energi yang lebih tinggi melalui berbagai cara yang berlainan, yang kesemuanya memerlukan energi tambahan dari luar (eksternal), misalnya melalui pemanasan atau dengan arus listrik. Diperlukan energi luar sebesar 82 kJ/mol atom untuk perpindahan elektron dari tingkat energi nol ke tingkat energi

selanjutnya, dan 134 kJ/mol atom untuk ketinggian energi berikutnya. Energi yang dibutuhkan untuk peningkatan elektron ke tingkat yang lebih jauh akan meningkat tajam, jauh melampaui jumlah energi sebelumnya. Jika kembali ke kondisi awalnya, elektron akan mengeluarkan energi yang sama besarnya dengan energi yang dipakai untuk menaikkannya ke tingkat yang lebih tinggi. Jumlah energi yang dipancarkan ini sudah pasti untuk elektron tertentu, yang kemudian akan memberi panjang gelombang tertentu. Jika panjang gelombang tersebut berada dalam spektrum cahaya yang masih terlihat, cahaya yang dipancarkan akan memiliki warna yang khas. Misalnya: cahaya yang dipancarkan oleh lampu jalan yang terbuat dari bahan natrium yang menjadi panas, selalu berwarna kuning; sementara cahaya dari lampu jalan dari bahan merkuri selalu berwarna biru.

Selanjutnya, marilah kita mempelajari mengapa natrium dan kalium berada dalam bentuk ion yang stabil dalam tubuh kita, mengapa gas mulia tidak reaktif, dan mengapa oksigen begitu reaktif. Dasarnya adalah setiap atom yang memiliki jumlah elektron yang lengkap (misalnya gas mulia) akan menjadi sangat stabil sehingga peluangnya untuk terlibat dalam reaksi kimia untuk membentuk senyawa menjadi jauh lebih rendah dari peluang atom yang mempunyai jumlah elektron pada kulit terluarnya masih belum lengkap.

Natrium. Natrium memiliki satu elektron dalam kulit terluarnya, yang semestinya berisi 2 elektron. Oleh karena itu, natrium berusaha melepaskan elektron agar supaya susunan elektron sama dengan susunan elektron neon, yang sangat stabil. Dengan melepaskan satu elektron (bermuatan negatif) tersebut, maka membentuk satu ion positif (ion Na, yang ditulis Na⁺). Karena natrium memiliki kecenderungan yang kuat untuk melepaskan elektron, unsur ini menjadi sangat reaktif.

Klor. Klor memiliki susunan elektron: 2 elektron pada kulit K, 8 elektron pada kulit L, dan 7 elektron pada kulit M (yang semestinya dapat berisi

8 elektron]. Unsur ini ternyata berupaya menarik satu elektron untuk melengkapi elektron pada kulit terluarnya, sehingga susunan elektronnya menjadi sama dengan susunan elektron dari unsur argon (yang sangat stabil). Dengan demikian menerima satu elektron (muatan negatif), sehingga menjadi ion Klor (Cl^-). Dengan demikian, klor juga menjadi sangat reaktif karena kecenderungannya yang sangat kuat untuk menarik elektron.

Oksigen. Oksigen memiliki susunan elektron: 2 elektron pada kulit K, 6 elektron pada kulit L. Untuk melengkapi elektron pada kulit L, oksigen cenderung berbagi 2 elektron lagi dari atom lain untuk mewujudkan stabilitas yang lebih kokoh. Dengan demikian, oksigen merupakan gas yang sangat reaktif.

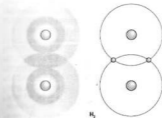
Karbon. Karbon memiliki 2 elektron pada kulit K, dan mempunyai 4 elektron pada kulit L (berarti kekurangan 4 elektron). Dengan demikian, cenderung melepas atau menerima empat elektron untuk melengkapi elektron terluarnya, sehingga dapat menjadi stabil. Oleh karena itu unsur ini melakukannya dengan cara berbagi elektron dengan unsur lainnya. Jadi, cara suatu atom atau unsur mengalami perubahan sehingga memiliki elektron yang lengkap di kulit terluarnya adalah melepas atau menerima elektron, dan berbagi elektron.

Molekul

Sebuah molekul tersusun dari satu atau beberapa atom. Beberapa unsur hanya memiliki satu atom dalam setiap molekulnya, misalnya golongan logam dan gas langka (helium, neon, argon, krypton, dan xenon). Unsur lainnya, memiliki 2 atom permolekulnya, misalnya oksigen (O_2), nitrogen (N_2), dan klorida (Cl_2). Bentuk lain dari oksigen, yaitu ozon (O_3) memiliki 3 atom permolekulnya. Ozon ditemukan di bagian atas atmosfer dan mempunyai kemampuan untuk menyerap sebagian besar sinar ultraviolet dari sinar matahari yang menuju bumi.

Sinar ultraviolet ini dapat menyebabkan kanker kulit pada manusia.

Molekul dari berbagai zat mampu bereaksi bersama dalam kondisi tertentu membentuk molekul yang baru.



Gambar 2.4 Molekul Hidrogen – ikatan kovalen antara 2 atom hidrogen (diadaptasi dari Fox Human Physiology [8^{edn}]. McGraw-Hill, 2003. p.25)

Campuran

Campuran dibentuk oleh 2 unsur atau lebih yang bergabung dengan proporsi berapapun besarnya. Unsur yang ada dalam campuran masih mempertahankan sifat individualnya. Misalnya, sulfur masih tetap berwarna kuning jika bercampur dengan bijih besi dan besi tetap berwarna abu-abu dan bersifat magnetik. Kedua zat tersebut masih bisa dipisahkan dari suatu campuran dengan menggunakan magnet. Besi tertarik oleh magnet dan sulfur tertinggal (tidak tertarik).

Campuran juga dapat terdiri dari senyawa-senyawa yang saling bercampur berapapun besar proporsinya senyawa yang bercampur tersebut. Dapat juga unsur bercampur dengan senyawa tanpa batas

proporsi. Udara merupakan campuran gas-gas, begitupun minyak bumi merupakan campuran cairan, dan tanah merupakan campuran zat padat dan sebagainya. Darah merupakan campuran yang sangat kompleks terdiri dari zat padat (albumin), cairan (air), gas (oksigen dan karbondioksida). Campuran merupakan kombinasi molekul-molekul atau unsur dengan molekul yang berlangsung hanya secara fisik, tidak secara kimiawi (tanpa merubah sifat kimiawi dari unsur atau molekul pembentuknya).

Senyawa

Senyawa terdiri dari 2 unsur atau lebih yang secara kimiawi bergabung dalam proporsi tertentu yang pasti/tetap berdasarkan massanya. Jika suatu unsur bergabung membentuk senyawa, maka akan terbentuk suatu zat yang baru yang mungkin memiliki sifat yang lebih banyak, berbeda dengan sifat unsur pembentuknya. Misalnya, sulfur dan besi membentuk senyawa (besi sulfida), warna kuning dari sulfur tidak lagi terlihat dan besi akan kehilangan sifat magnetiknya. Begitupula saat hidrogen (H_2) yang terbakar disertai dengan ledakan, bergabung dengan oksigen (O_2) yang memerlukan pembakaran, maka terbentuklah senyawa air (H_2O) yang biasanya dimanfaatkan untuk memadamkan suatu kebakaran. Contoh-contoh tersebut diatas menunjukkan bahwa senyawa berbeda dengan campuran. Sifat senyawa berbeda dengan sifat unsur pembentuknya dan berlangsung secara kimiawi dalam proporsi tertentu dan bersifat tetap.

Biasanya pemberian nama suatu senyawa disesuaikan dengan unsur yang membentuknya. Cara singkat untuk menjelaskan suatu senyawa adalah dengan menuliskan rumus kimianya. Rumus kimia suatu senyawa menunjukkan jenis dan jumlah atom yang dikandungnya, misalnya karbon dioksida mengandung satu atom karbon dan dua atom oksigen (ditunjukkan dengan awalan - di) dan rumus kimianya CO_2 , (angka 2 ditulis di bawah huruf O - subscript).

Unsur-unsur yang membentuk tubuh manusia

Jumlah unsur yang ditemukan dalam tubuh hanya sedikit. Dalam kenyataannya, 95% organisme hidup terdiri hanya dari empat unsur yaitu karbon, oksigen, hidrogen, dan nitrogen. Dalam tubuh manusia, ditemukan oksigen (65,5%), karbon (18,0%), hidrogen (10,0%), nitrogen (3,0%), kalsium (1,5%), fosfor (1,0%), kalium (0,4%), sulfur (0,3%), natrium (0,2%), klorin (0,1%) dan magnesium (0,1%).

Juga ditemukan unsur-unsur dalam jumlah yang sangat kecil (trace), misalnya besi (Fe), iodin (I), tembaga (Cu), krom (Cr), dan seng (Zn) diperlukan dalam jumlah yang sangat sedikit oleh tubuh. Unsur-unsur tersebut banyak ditemukan sebagai bagian dari enzim atau diperlukan untuk aktivitas enzim. Bila unsur-unsur tersebut berlebihan, maka dapat menjadi toksik. Unsur toksik, seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), arsen (As), dan talium (Tl) dapat menyebabkan kematian bila berlebihan dalam tubuh.

Tabel 3.4 Unsur yang membentuk tubuh manusia

Nama	Simbol	Komposisi rata-rata berdasarkan berat (%)	Fungsi
Oksigen	O	65	Untuk pemapasan sel; terdapat dalam sebagian besar senyawa organik
Karbon	C	18	Membentuk struktur molekul organik; dapat membentuk empat ikatan dengan atom lain
Hidrogen	H	10	Terdapat dalam senyawa organik; keseimbangan asam-basa
Nitrogen	N	3	Komponen pada semua protein asam nukleat (struktur genetik)

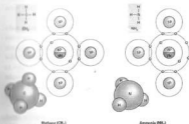
Nama	Simbol	Komposisi rata-rata berdasarkan berat (%)	Fungsi
Kalsium	Ca	1,5	Komponen tulang dan gigi; keseimbangan asam-basa; kontraksi otot, impuls saraf, dan pembekuan darah
Fosfor	P	1	Komponen pada asam nukleat; tulang dan dinding sel; penghantaran panas
Kalium	K	0,4	Kation pokok dalam sel; kontraksi otot, keseimbangan cairan dan elektrolit
Sulfur	S	0,3	Komponen pada kebanyakan protein
Natrium	Na	0,2	Kation utama interseluler; impuls saraf; keseimbangan cairan dan elektrolit
Magnesium	Mg	0,1	Sebagai ko-enzim
Klor	Cl	0,1	Anion utama interseluler; keseimbangan cairan dan elektrolit; komp NaCl, dan asam lambung
Besi	Fe	Sangat kecil	Komponen hemoglobin, mioglobin, & enzim
Yodium	I	Sangat kecil	Komponen hormone Tiroid

Ikatan Kimia

Ada dua jenis ikatan kimia yang terdapat dalam sistem biologis; yaitu: ikatan kovalen (*covalent bonds*) dan (2) ikatan nonkovalen (*noncovalent bonds*). Ikatan kovalen dalam sistem biologis, juga ada 2, yaitu: ikatan kovalen polar dan ikatan kovalen nonpolar; sementara ikatan nonkovalen terdiri dari 4 jenis, yaitu: ikatan ionik, hidrogen, ikatan hidrofobik dan interaksi van der Waals.

Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen melibatkan pemakaian bersama elektron untuk membentuk molekul senyawa atau unsur. Jika ikatan ini terurai, akan terbentuk senyawa atau atom (atau juga keduanya) yang baru.



Gambar 2.5 Molekul Metana dan Amonia – ikatan kovalen non polar (diadaptasi dari Fox Human Physiology (8th Edn). McGraw Hill, 2003. p.26)

Jika dua atom bukan logam bereaksi bersama, kedua atom tersebut akan membuat kulit terluar penuh elektron dengan cara berbagi elektron (menggunakan elektron secara bersama). Senyawa yang terbentuk disebut molekul dan ikatan yang mengikat atom-atom dalam molekul disebut ikatan kovalen. Molekul terdapat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Molekul dapat hanya mengandung dua atom, seperti hidrogen, atau dapat juga mengandung berjuta-juta atom seperti pada DNA (*deoxyribonucleic acid*, asam deoksiribonukleat).

Hidrogen. Atom hidrogen memiliki satu elektron pada kulit terluarnya dan memenuhi kulitnya dengan berbagi elektron ini dengan atom hidrogen lainnya. Ikatan kovalen tunggal digambarkan dengan suatu garis, sehingga molekul hidrogen dapat juga ditulis H-H atau H_2 .

Klorin. Klorin memiliki tujuh elektron di kulit terluar dan memenuhi kulitnya dengan berbagi satu elektron dengan klorin lainnya. Ikatan kovalen tunggal digambarkan dengan satu garis, sehingga molekul klorin dapat ditulis sebagai Cl-Cl atau Cl_2 .

Karena hanya elektron pada kulit terluar yang bereaksi, maka hanya kulit terluar yang digambarkan, agar lebih sederhana. Jika ikatan kovalen dipecahkan maka dapat terbentuk radikal bebas. Radikal bebas digambarkan sebagai suatu titik, misalnya radikal bebas klorin, $Cl\cdot$. Radikal bebas sangat reaktif karena memiliki elektron yang tidak berpasangan. Di dalam tubuh, radikal bebas menyebabkan berbagai macam reaksi, mulai dari bintik-bintik penuaan hingga keriput pada kulit, penyakit ginjal dan hati, serta kanker. Radikal bebas menyebabkan kerusakan irreversible pada molekul biologis seperti protein dan asam nukleat.

Tubuh memproduksi substansi yang disebut antioksidan untuk melawan efek radikal bebas. Antioksidan bekerja dengan mendonorkan elektron kepada radikal bebas, sehingga membuatnya stabil. Nutrien seperti vitamin A, C, dan E dan mineral seperti selenium dan Zn juga berfungsi sebagai antioksidan.

Molekul kovalen polar dan nonpolar

Atom elektronegatif seperti oksigen menarik elektron dalam ikatan ke arah dirinya, yang mengakibatkan bagian elektron yang terikat tidak sama. Bentuk molekul air, H_2O , seperti huruf V, disebut polar. Atom oksigen menjadi sedikit bermuatan negatif, karena kelebihan elektron dan hal ini ditunjukkan oleh Hidrogen menjadi sedikit positif, karena oksigen mendapatkan bagian elektron terikat lebih banyak. Molekul polar tertarik ke molekul polar lainnya dan partikel-partikel yang bermuatan.



Rangkaian 2.6 Molekul Air – ikatan kovalen polar

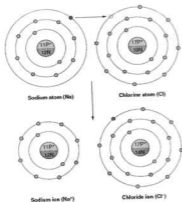
(Ditulis dari Vander Human Physiology (8th edn). McGraw-Hill, 2001. p.15)

Molekul seperti karbon dioksida dan metana (gas alam) merupakan molekul kovalen nonpolar. Pada karbon dioksida, daya tarik elektron pada satu atom oksigen dinetralkan oleh atom oksigen lainnya.

Molekul kovalen lainnya, antara lain: amonia (NH_3) berbentuk piramid dengan massa molekul 17 g, glukosa ($C_6H_{12}O_6$) berbentuk cincin dengan massa molekul 180 g, asam amino (alanin) berbentuk tetrahedral dengan massa 89 g, dan DNA (asam ribonukleat) berbentuk heliks ganda dan bermassa sangat besar.

Ikatan Ionik

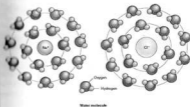
Ikatan ion atau ikatan elektrolen terbentuk dari unsur logam dan bukan logam, dimana unsur logam kehilangan elektron, sedangkan unsur bukan logam menerima elektron sehingga kedua atom tersebut dapat memenuhi jumlah elektron pada kulit terluarnya. Misalnya, ikatan antara natrium dan klorida.



Gambar 2.7 Reaksi antara Na dan Cl membentuk NaCl – ikatan ion
[Diuilang dari Fox Human Physiology (8thedn), McGraw-Hill, 2003, p.26]

Ikatan ionik dibentuk antara atom logam dan bukan logam.

Terbentuk ion-ion (partikel bermuatan) dan terbentuk ketika suatu atom kehilangan atau mendapatkan elektron. Unsur logam memenuhi kulit terluarnya dengan melepaskan elektron terluarnya ke atom bukan logam. Hasilnya adalah pembentukan ion bermuatan positif, disebut kation. Contohnya, natrium memiliki satu elektron di kulit terluar, dan melepaskan satu elektron tersebut untuk membentuk kation agar kulit terluarnya penuh. Unsur bukan logam memenuhi kulit terluarnya dengan menerima elektron. Terbentuk suatu ion bermuatan negatif yang disebut anion. Contohnya, klorin memiliki tujuh elektron di kulit terluar, dan memenuhi kulitnya dengan menerima satu elektron dan membentuk anion klorida. Ketika natrium bereaksi dengan klorin, maka atom natrium akan melepaskan elektron ke atom klorin. Terbentuklah ikatan ionik antara dua ion tersebut, kation bermuatan positif dan anion bermuatan negatif. Muatan yang berlawanan saling tarik-menarik dan gaya tarik antara kation dan anion inilah yang membentuk ikatan ionik atau ikatan elektrolen.



Gambar 2.8 Larutan NaCl

[Uilang dari Fox Human Physiology (8thedn), McGraw-Hill, 2003, p.27]

Senyawa ionik akan menghantarkan listrik jika dilelehkan atau dilarutkan dalam air karena mereka akan berdisosiasi menjadi ion-ion (Gambar 3.9). Senyawa ini disebut elektrolit, dan arus listrik dibawa oleh ion-ion yang ada. Elektrolit sangat penting dalam tubuh untuk konduksi impuls saraf dan kontraksi otot dan juga mempertahankan keseimbangan cairan tubuh.

Beberapa elektrolit hanya merupakan ion tunggal seperti ion natrium (Na^+) dan ion klorida (Cl^-) tetapi ada juga ion yang merupakan kumpulan atom seperti bikarbonat (HCO_3^-). Ion yang seperti ini disebut juga ion poliatom (tabel 3.5). Walaupun ion bikarbonat (HCO_3^-) mengandung tiga atom, namun tetap bersifat seperti ion sederhana dengan muatan negatif.

Ikatan ionik ini berasal dari saling tarik menarik ion yang bermuatan positif dan negatif. Tidak seperti ikatan kovalen atau ikatan hidrogen, ikatan ionik tidak mempunyai orientasi geometrik yang spesifik oleh karena medan elektostatik disekitar ion, menarik muatan yang berlawanan, sehingga orientasi geometrisnya sama ke semua arah.

Dalam cairan tubuh, ion-ion yang mempunyai peranan biologis penting seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Cl^- , tidak berdiri sendiri, tetapi dikelilingi dengan kuat oleh molekul air. Sebagian besar ikatan ionik larut dalam air oleh karena sejumlah besar energi akan dilepaskan bila ion terikat dengan kuat pada molekul air. Ion-ion memegang peranan penting bila mereka melalui membran sel melalui saluran ion (ion-channel). Pergerakan ion merupakan faktor penting untuk konduksi impuls pada sel saraf dan untuk kontraksi otot.

Tabel 3.5 Fungsi ion poliatom dalam tubuh

Ion Poliatom	Fungsi
Amonium (NH_4^+)	Mengatur keasaman urin
Dihidrogen fosfat (H_2PO_4^-)	Mengatur keasaman urin
Mono-hidrogen fosfat (HPO_4^-)	Mengatur keasaman urin
Bikarbonat (HCO_3^-)	Mengatur keasaman darah
Fosfat (PO_4^-)	Bagian dari struktur tulang, Salah satu unit ATP

Ikatan hidrogen (hydrogen bonds)

Atom hidrogen pada dasarnya membentuk ikatan kovalen dengan hanya satu atom lainnya. Akan tetapi, atom hidrogen juga dapat membentuk ikatan nonkovalen. Pada ikatan hidrogen, atom hidrogen dikait oleh 2 atom lain. Atom dimana ion hidrogen terikat disebut donor, sedangkan atom lainnya disebut akseptor. Ikatan hidrogen yang paling umum kita ketahui adalah air, dimana atom hidrogen mengikat atom oksigen (dalam hal ini atom oksigen disebut donor). Kekuatan ikatan hidrogen pada molekul air adalah 5 kkal/mol, jauh lebih lemah dari ikatan kovalen C-H, tetapi lebih kuat dari ikatan Van der Waals. Ikatan hidrogen pada molekul air sangat penting perannya sebab semua aktifitas sel membutuhkan lingkungan mengandung air. Grup amino ($-\text{NH}_2$) dan hidroksil ($-\text{OH}$) merupakan ikatan hidrogen yang paling sering terlibat dalam sistem biologis. Adanya grup tersebut membuat banyak molekul dapat larut dalam air. Misalnya, ikatan grup $-\text{OH}$ dalam methanol (CH_3OH) dan methylamine (CH_3NH_2) dapat membentuk banyak ikatan hidrogen dengan air, sehingga molekul tersebut larut dalam air. Struktur double helix dari DNA terikat satu sama lainnya dengan ikatan hidrogen.

Interaksi Van der Waals (Van der Waals interaction)

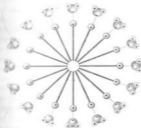
Bila 2 atom saling mendekati satu sama lainnya, mereka akan membentuk kekuatan daya tarik yang lemah dan tidak spesifik yang membentuk interaksi atau ikatan Van der Waals, nama ahli fisika

Belanda Johannes Diderik van der Waals (1837-1923), yang pertama kali menjelaskan interaksi tersebut. Dasar dari ikatan ini adalah bahwa distribusi dan muatan listrik di sekitar atom tidak seluruhnya simetris. Sifat asimetris yang bersifat temporer ini akan menyebabkan distribusi yang asimetris dari elektron yang terdapat di sekitar atom. Akibatnya, tarik menarik antara pasangan atom akan meningkat bila jarak antara keduanya semakin dekat. Semua jenis molekul, baik polar maupun nonpolar mempunyai interaksi Van der Waals. Interaksi ini bertanggung jawab terhadap kohesi diantara molekul dari non polar liquid dan solid. Seperti pada heptane yang tidak dapat membentuk ikatan ionik dan hidrogen dengan molekul lain.

Energi pada interaksi Van der Waals kira-kira 1 kJ/mol, jadi lebih lemah dari ikatan hidrogen. Contoh dari interaksi Van der Waals adalah interaksi antara molekul antibodi dan antigennya yang spesifik dan antara berbagai enzim dengan substrat yang spesifik untuk enzim tertentu.

Interaksi hidrofobik (hydrophobic interaction)

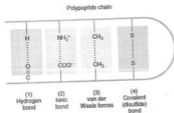
Ikatan nonpolar tidak larut dalam air sehingga disebut hidrofobik. Ikatan kovalen antara 2 atom antara atom karbon dan hidrogen merupakan ikatan nonpolar yang paling banyak terdapat dalam sistem biologis. Hidrokarbon - molekul yang hanya terdiri atas atom karbon dan hidrogen - tidak dapat larut dalam air. Semua membran dalam sistem biologis, termasuk membran sel, tersusun atas molekul hidrokarbon dan hanya sedikit molekul air atau molekul polar lainnya.



Gambar 2.9 Interaksi hidrofobik

Principles of Human Physiology (8th Edn), McGraw-Hill, 2003, p.37

Kekuatan yang menyebabkan molekul hidrofobik atau bagian nonpolar dan molekul melakukan agregasi dan tidak larut dalam air disebut ikatan hidrofobik, atau interaksi hidrofobik. Kekuatan ini disebabkan oleh energi yang dibutuhkan untuk memasukkan molekul nonpolar di dalam air. Molekul nonpolar tidak dapat membentuk ikatan hidrogen dengan air, oleh karena itu molekul air akan diubah, dan memaksa air untuk mengelilingi ikatan di sekitarnya tanpa mengadakan ikatan dengan molekul nonpolar. Sedangkan molekul nonpolar akan terikat bersama melalui interaksi Van der Waals. Akibatnya terjadi kecenderungan dari molekul hidrofobik terikat bersama dan tidak dapat larut dalam air.



Gambar 2.10 Berbagai ikatan kimia pada polipeptida

(Ditulis dari Vander Haman *Physiology* [5thEdn], McGraw-Hill, 2001, p.29)

Tabel 2.6 Kekuatan ikatan antara atom-atom dan molekul

Ikatan	Kekuatan	Sifat	Contoh
Hydrogen	Lemah	Atraksi antara ikatan-ikatan polar	Atraksi antara molekul air, antara ikatan-ikatan peptide pembentuk struktur heliks protein, bagian polar asam amino
Ionik	Kuat	Atraksi elektrolit antara kelompok ion yang berlawanan	Antara Na ⁺ dan Cl ⁻ dalam garam
Van der Waals	Sangat lemah	Atraksi antara molekul nonpolar kovalen atau antara molekul yang saling berdekatan	Atraksi antara nonpolar asam amino dari protein, antara molekul-molekul lemak
Kovalen	Sangat kuat	Berbagi elektron antara ikatan atom-atom non polar	Sebagian besar antara atom-atom untuk membentuk molekul

Ikatan Kovalen dan Energi

Pembentukan ikatan kimia mewakili proses perpindahan energi. Dalam setiap reaksi kimia, ada beberapa ikatan yang diputus, dan pada tingkat yang hampir bersamaan ikatan kimia lainnya dibentuk sehingga terjadi perpindahan energi. Perubahan tersebut mencakup:

1. Pemutusan ikatan kimia yang sudah ada yang melibatkan perubahan energi;
2. pembentukan ikatan kimia baru yang melibatkan perubahan energi;
3. hasil pemutusan kimia yang sudah ada dan pembentukan ikatan kimia yang baru bergantung pada besar relatif energi yang terlibat. Misalnya, reaksi antara gas H₂ dan gas Cl₂ membentuk 2 gas HCl (hidrogen klorida), menghasilkan cukup banyak energi. Ikatan H-H dan Cl-Cl diputus melepaskan energi. Pembentukan gas HCl membutuhkan energi, tetapi energi yang dihasilkan dari pemecahan H₂ dan Cl₂ lebih besar daripada yang dibutuhkan untuk membentuk gas HCl. Jadi, tubuh manusia mampu menggunakan cadangan energi yang tersimpan dalam ikatan kimia untuk memasok energi yang dibutuhkan untuk proses metabolisme dan untuk menyimpan cadangan energi tersebut dalam bentuk ikatan kimia lain, sehingga siap di tempat ketika dibutuhkan.

Tabel 3.6 Perbedaan ikatan ion dengan ikatan kovalen

Ikatan Ion	Ikatan Kovalen
terbentuk dengan berikatan dengan nonlogam	Nonlogam dengan nonlogam
terjadi transfer electron	Berbagi electron
terbentuk ion - gaya tarik menarik antara ion mengikat senyawa bersama	Tidak ada pembentukan ion
Titik didih dan titik leleh tinggi	Titik didih dan titik leleh rendah
Berbentuk padat pada suhu ruangan	Berbentuk padat, cair atau gas
Elektronik - mengantar listrik	Bukan elektrolit - tidak menghantar listrik
Sebagian besar larut dalam air	Sebagian besar tidak larut dalam air

Ikatan Ganda

Ikatan ganda seperti O_2 ($O=O$) yang memakai 2 pasangan elektron secara bersama (ikatan kovalen). Unsur karbon mampu membentuk ikatan sebagai berikut: (1) $C-C$, satu elektron dipakai bersama (ikatan tunggal); (2) $C=C$, 2 elektron dipakai bersama (ikatan ganda); (3) $C\equiv C$ dengan 3 pasangan elektron yang dipakai bersama (ikatan triple). Senyawa yang mengandung ikatan tunggal saja diantara atom-atomnya karbonnya dikatakan bersifat jenuh; sedangkan senyawa yang mengandung ikatan ganda atau ikatan triplel antara atom-atom karbon dikatakan tak jenuh.

Persamaan kimia

Persamaan kimia merupakan suatu jalan untuk menunjukkan perubahan kimia yang terjadi saat unsur atau senyawa bereaksi bersama. Persamaan ini menunjukkan substansi apa yang bereaksi bersama (reaktan, pereaksi) dan substansi baru apa yang terbentuk (produk). Persamaan dapat ditulis dalam kata-kata atau simbol. Beberapa prinsip yang perlu diketahui dalam suatu persamaan kimia, antara lain:

- (1) selalu melibatkan perubahan energi (melepaskan atau memperoleh energi);
- (2) jumlah atom suatu unsur harus sama pada kedua sisi persamaan;
- (3) dalam menghitung atom subscript angka yang berada di belakang sebuah atom hanya mengacu pada atom tersebut [H_2SO_4 berarti angka 2 hanya mengacu pada atom H, angka 4 hanya mengacu pada atom O. Artinya 2 atom H, satu atom S dan 4 atom O].
- (4) Jika ada angka yang diletakkan di depan rumus, misalnya: $2H_2SO_4$ maka semua atom dalam rumus tersebut dikalikan dengan angka 2. Berarti ada ada 4 atom H, 2 atom S dan 8 atom O.
- (5) Anak panah tunggal yang menuju satu arah berarti dalam keadaan normal, reaksi berlangsung satu arah saja. Jika anak panah bolak

balik, menuju ke dua arah, maka reaksi disebut reaksi ekuilibrium. Dalam tubuh manusia, kebanyakan reaksi kimia berlangsung secara ekuilibrium.

- (6) Label (s) menunjukkan bentuk solid (padat), (l) menunjukkan bentuk liquid (larutan), dan (g) menunjukkan bentuk gas (gas).

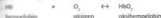
Contoh



Tanda panah tunggal \rightarrow menunjukkan bahwa semua atau hampir semua reaktan akan berubah menjadi produk. Tanda panah menunjukkan arah reaksi, reaksi ini berlangsung dari kiri ke kanan (reaksi ke depan).

Tanda panah ganda \leftrightarrow menunjukkan suatu reaksi yang reversibel. Pada reaksi reversibel, reaksi dapat terjadi dua arah, yaitu reaktan menjadi produk dan produk berubah kembali menjadi reaktan.

Contoh reaksi reversibel dalam tubuh adalah reaksi antara hemoglobin dan oksigen:



Pada reaksi reversibel, ketika kecepatan reaksi ke depan (kiri ke kanan) menyamai kecepatan reaksi sebaliknya (kanan ke kiri), maka akan terjadi keseimbangan antara produk dan reaktan. Hal ini disebut sebagai reaksi kesetimbangan (ekuilibrium). Dua tanda panah setengah menunjukkan reaksi kesetimbangan. Hal ini merupakan situasi dinamis karena reaktan akan terus menerus berubah menjadi produk dan produk

kembali menjadi reaktan. Namun demikian, konsentrasi atau jumlah reaktan dan produk selalu tetap sama pada kesetimbangan pada kondisi tertentu.

Reaksi kesetimbangan sangat penting dalam mempertahankan kondisi homeostatik dalam tubuh. Jika seseorang dalam keadaan sakit, kondisi dalam tubuh berubah dan hal ini dapat mengubah posisi kesetimbangan. Perubahan terpenting dalam sistem fisiologis adalah perubahan konsentrasi reaktan dan produk. Efek dari perubahan kesetimbangan dapat diprediksi menggunakan prinsip Le Chatelier. Ia menyatakan bahwa jika suatu kesetimbangan terganggu oleh kondisi yang berubah, maka reaksi akan berpindah untuk mengatasi perubahan tersebut.

Jika konsentrasi oksigen di dalam tubuh menurun, misalnya di jaringan, maka kesetimbangan akan berubah untuk mengkompensasi hal ini. Kesetimbangan akan berpindah ke kiri, sehingga konsentrasi oksihemoglobin di dalam kesetimbangan akan menurun tetapi konsentrasi oksigen akan meningkat. Jika konsentrasi oksigen meningkat misalnya di kapiler alveoli paru, maka kesetimbangan akan bergeser ke kanan, sehingga konsentrasi oksihemoglobin akan meningkat dan konsentrasi oksigen akan menurun.

Jenis reaksi kesetimbangan ini memastikan bahwa oksihemoglobin melepaskan oksigen ke jaringan jika diperlukan dan hemoglobin mengambil oksigen jika terdapat banyak persediaan oksigen.

Konsep MOL

Mol adalah jumlah suatu zat yang mengandung $6,02 \times 10^{23}$ partikel (atom, ion, atau molekul). Simbol untuk satuan mol adalah Angka 6×10^{23} disebut juga konstanta Avogadro (sebutan lamanya angka Avogadro). Konstanta Avogadro dinyatakan oleh simbol NA dan didefinisikan sebagai jumlah atom pada 12 g isotop karbon-12.

Jadi, mol adalah jumlah yang mengandung angka yang pasti, jumlah yang sangat besar tetapi tetap merupakan jumlah, seperti halnya 100 koin berarti 12 atau satu gross berarti 144. Satu mol dari unsur apa pun merupakan massa atom relatifnya yang dinyatakan dalam gram.

Untuk atom natrium: 1 mol atom natrium akan memiliki massa 23 g dan mengandung 6×10^{23} atom. $1/2$ mol atom natrium akan memiliki massa $1/2$ (23 g) dan mengandung $1/2$ (6×10^{23}) atom massa molar karbon yaitu 12,0 g/mol dan satu mol karbon memiliki massa 12,0 g.

Massa rumus relatif

Massa rumus relatif suatu senyawa dapat dihitung dengan menjumlahkan semua massa atom relatif dari setiap atom. Massa atom relatif setiap atom dapat dilihat pada tabel periodik. Misalnya, massa rumus relatif natrium bikarbonat dapat dihitung sebagai berikut: **Natrium bikarbonat, NaHCO_3**



Massa satu mol natrium bikarbonat merupakan massa rumus relatif yang dinyatakan dalam gram, misalnya 84 g.

Untuk molekul digunakan istilah massa molekul relatif, jadi massa molekul relatif glukosa dapat dihitung sebagai berikut:

Glukosa, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$



Massa satu mol glukosa merupakan massa molekul relatifnya yang dinyatakan dalam gram, yaitu 180 g.

Materi

Materi (zat; bisa atom, atau molekul) adalah sesuatu yang menempati ruang dan memiliki massa. Semua materi terdiri dari partikel. Materi dapat berwujud padat (solid), cair (liquid), dan gas. Jika zat padat dipanaskan, maka zat tersebut akan berubah wujud dan membentuk cairan (molekul). Jika cairan ini terus dipanaskan, maka akan terjadi perubahan wujud lagi, menjadi gas (menguap). Beberapa substansi dapat berubah dari wujud padat ke gas secara langsung (menyublim), misalnya iodin.

Semua partikel memiliki energi kinetik (energi gerakan). Partikel padat hanya memiliki sedikit energi kinetik, partikel cair memiliki lebih banyak, dan partikel gas memiliki energi kinetik terbesar. Perubahan wujud selalu melibatkan penambahan atau pengurangan energi. Bila suatu materi menyerap energi, maka energi kinetik partikel-partikelnya akan meningkat melalui materi tersebut dapat berubah wujud dari padat menjadi air, lalu kemudian berwujud gas. Bila sebaliknya, mengeluarkan energi, maka energi kinetiknya menurun, dan akan terjadi perubahan wujud dari gas menjadi cair (mengembun), dari cair menjadi padat (membeku). Dari gas langsung ke padat disebut solidifikasi. Panas dikeluarkan oleh tubuh melalui perubahan wujud keringat, dari cair menjadi gas, terutama pada saat berolahraga.

Materi dalam wujud padat memiliki bentuk dan volume yang tetap, partikel-partikelnya tidak bergerak, tetapi bergetar pada satu tempat. Mempunyai gaya tarik menarik antar partikel yang kuat dibanding air, dan gas. Materi dalam bentuk cair; mengalir, volume tetap tetapi berubah bentuk sesuai dengan wadahnya. Partikel-partikel bergerak dan bergesekan satu sama lainnya. Materi dalam bentuk gas; mengalir tidak memiliki volume dan bentuk yang pasti, mengisi seluruh ruang yang ada. Hampir tidak ada gaya tarik menarik antar partikel, partikel bergerak secara acak dan saling bertumbukan satu sama lainnya, dan juga bertumbukan dengan dinding wadah.

Ringkasan

1. Atom merupakan partikel terkecil, yang terdiri dari proton, neutron, dan elektron
2. Senyawa unsur yang telah ditemukan tertuang dalam tabel periodik dan dibagi menjadi kelompok logam dan nonlogam
3. Isotop adalah atom-atom dari unsur yang sama yang memiliki nomor atom sama tetapi memiliki nomor massa berbeda, jadi memiliki jumlah neutron yang berbeda
4. Senyawa terbentuk jika atom bergabung melalui ikatan kimia.
5. Ratan ionik terbentuk melalui transfer elektron antara unsur logam dan nonlogam
6. Ratan kovalen terbentuk melalui penggunaan elektron secara bersama antara dua unsur nonlogam
7. Ion merupakan atom yang bermuatan, ion positif adalah kation, ion negatif adalah anion
8. Radikal bebas merupakan spesies yang memiliki elektron yang tidak berpasangan
9. Satu mol terdiri dari 6×10^{23} partikel.
10. Satu mol dari atom apa pun merupakan massa relatif atom tersebut yang dinyatakan dalam gram.

Soal Latihan

1. Kromium-51 digunakan untuk analisis sel darah merah. Hitunglah jumlah elektron, proton, dan neutron yang dimilikinya.
2. Carilah massa satu mol dari:
 - a. Karbondioksida
 - b. Metana
 - c. Glukosa
3. Perkirakan jenis ikatan (ionik atau kovalen) pada senyawa berikut:
 - a. Air
 - b. Hemoglobin
 - c. Natrium klorida

4. Mengapa luka bakar akibat uap secara potensial lebih berbahaya daripada luka bakar akibat air panas?
5. Dokter meresepkan tablet ferrous sulfat untuk anemia, unsur logam apa yang dikandung tablet tersebut?

Bacaan Lebih Lanjut

1. *Anatomy and Physiology* (6th edn). McGraw-Hill Co., 2004. p. 27 – 57.
2. *Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function* (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 12 – 30.
3. *Fox Human Physiology* (8th edn). McGraw-Hill Co., 2003. p. 24 – 45.
4. James, J. Baker, C. Swain, H. 2002. *Prinsip-Prinsip Sains untuk Keperawatan*. Edisi Bahasa Indonesia. Penerbit EMS. h. 1 – 18.

BAB 3 Biomolekul

Dasaran Pembelajaran

Pada akhir bab ini pembaca akan mampu untuk:

1. Menerangkan struktur atom dan terminologi elektron, proton, dan neutron
2. Mendefinisikan istilah unsur, molekul, ion, radikal, senyawa, nomor atom, nomor massa, dan isotop
3. Menyebutkan unsur utama yang terkandung dalam tubuh
4. Menjelaskan bagaimana ikatan ionik dan kovalen terbentuk
5. Membedakan antara molekul polar dan nonpolar
6. Menjelaskan konsep mol

Biomolekul adalah molekul besar maupun molekul kecil apapun yang terdapat dalam organisme hidup dan dibuat oleh sel. Biomolekul - karbohidrat (pati dan gula), lipid (lemak dan minyak), protein, dan asam nukleat (materi genetik) semua mengandung karbon dan hydrogen sehingga disebut senyawa hidrokarbon. Biomolekul juga mengandung gugus atom spesifik (gugus fungsional) yang bertanggung jawab untuk struktur, reaktivitas, dan fungsinya.

Senyawa Hidrokarbon

Semua makhluk hidup mengandung karbon. Manusia mengandung karbon sekitar 18%. Cabang ilmu kimia yang mempelajari senyawa hidrokarbon adalah kimia organik. Pada awalnya kata organik berarti ditemukan dari makhluk hidup, tetapi sekarang beribu-ribu senyawa organik seperti obat-obatan dan plastik dibuat secara artifisial di laboratorium.

Hidrokarbon merupakan senyawa paling sederhana. Masing-masing senyawa terdiri dari karbon dan atom hidrogen saja. Di dalam tubuh ditemukan ada 3 jenis, yaitu: hidrokarbon jenuh, tidak jenuh dan hidrokarbon aromatik. Ketiga hidrokarbon ini merupakan cikal bakal banyak senyawa lain.

Hidrokarbon jenuh (Alkana)

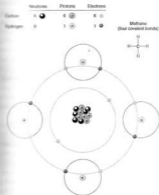
Hidrokarbon jenuh merupakan hidrokarbon yang senyawanya hanya memiliki ikatan tunggal. Bentuknya dapat berupa senyawa "berantai lurus" atau bercabang. Rumus umumnya adalah C_nH_{2n+2} (alkana). Pada metana (CH_4), atom karbon memiliki valensi 4 dan berbagi total 8 elektron - 4 elektron dari kulit terluar dari atom karbon dan 4 elektron lainnya berasal dari atom hidrogen, yang menyumbang masing-masing satu elektron [Gambar 3.1]. Pada etana (C_2H_6) dan propana (C_3H_8), juga senyawa serupa lainnya; dapat dilihat bahwa masing-masing atom karbon memiliki valensi 4 dan berbagi total 8 elektron - 4 dari kulit terluar dari atom karbon dan 4 elektron lainnya berasal dari atom hidrogen, yang menyumbang masing-masing satu elektron. Begitupula untuk hexana ($n=6 \rightarrow C_6H_{14}$) dan lain-lain.

Semua hidrokarbon jenuh berakhir dengan kata "ana". Awalan pada setiap nama akan menunjukkan jumlah atom karbon yang dimiliki, yaitu: met- ($n=1$), et- ($n=2$), prop- ($n=3$), bu- ($n=4$), pent- ($n=5$), heks- ($n=6$), hept- ($n=7$), okt- ($n=8$), non- ($n=9$) dan dek- ($n=10$); sehingga nama-nama hidrokarbon tersebut menjadi metana, etana, propana, butana, pentana, heksana, heptana, oktana, nonana dan dekana. Senyawa hidrokarbon jenuh membentuk dasar dari begitu banyak rantai panjang yang ditemukan dalam makanan, seperti: karbohidrat, lemak dan protein.

Hidrokarbon takjenuh

Hidrokarbon disebut takjenuh jika dalam molekulnya terdapat sedikitnya salah satu jenis ikatan karbon-karbon, berupa ikatan ganda (Alkena) dengan rumus molekul C_nH_{2n} , atau triple (Alkuna) dengan rumus molekul C_nH_{2n-2} .

Hidrokarbon takjenuh jauh lebih reaktif daripada hidrokarbon jenuh karena zat semacam hidrogen dan klorin dapat ditambahkan ke dalam ikatan ganda. Reaksi tersebut merupakan reaksi tipikal berupa penambahan satu atom hidrogen ke dalam setiap atom karbon di sepanjang ikatan ganda sehingga mengubah ikatan ganda menjadi ikatan tunggal. Bila ditambahkan hidrogen disebut sebagai hidrogenasi dan bila ditambahkan klorin, maka disebut klorinasi.



Gambar 3.1 Hidrokarbon jenuh - Metana

(Ditulis dari Vander Hamen Physiology (8th edn). McGraw-Hill, 2001, p.14)

Hidrokarbon merupakan senyawa paling sederhana. Masing-masing senyawa terdiri dari karbon dan atom hidrogen saja. Di dalam tubuh ditemukan ada 3 jenis, yaitu: hidrokarbon jenuh, tidak jenuh dan hidrokarbon aromatik. Ketiga hidrokarbon ini merupakan cikal bakal banyak senyawa lain.

Hidrokarbon jenuh (Alkana)

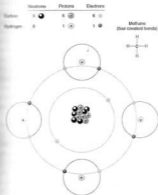
Hidrokarbon jenuh merupakan hidrokarbon yang senyawanya hanya memiliki ikatan tunggal. Bentuknya dapat berupa senyawa "berantai lurus" atau bercabang. Rumus umumnya adalah C_nH_{2n+2} (alkana). Pada metana (CH_4), atom karbon memiliki valensi 4 dan berbagi total 8 elektron - 4 elektron dari kulit terluar dari atom karbon dan 4 elektron lainnya berasal dari atom hidrogen, yang menyumbang masing-masing satu elektron (Gambar 3.1). Pada etana (C_2H_6) dan propana (C_3H_8), juga senyawa serupa lainnya; dapat dilihat bahwa masing-masing atom karbon memiliki valensi 4 dan berbagi total 8 elektron - 4 dari kulit terluar dari atom karbon dan 4 elektron lainnya berasal dari atom hidrogen, yang menyumbang masing-masing satu elektron. Begitupula untuk heksana ($n=6 \rightarrow C_6H_{14}$) dan lain-lain.

Semua hidrokarbon jenuh berakhir dengan kata "ana". Awalan pada setiap nama akan menunjukkan jumlah atom karbon yang dimiliki, yaitu: met- ($n=1$), et- ($n=2$), prop- ($n=3$), bu- ($n=4$), pent- ($n=5$), heks- ($n=6$), hept- ($n=7$), okt- ($n=8$), non- ($n=9$) dan dek- ($n=10$); sehingga nama-nama hidrokarbon tersebut menjadi metana, etana, propana, butana, pentana, heksana, heptana, oktana, nonana dan dekana. Senyawa hidrokarbon jenuh membentuk dasar dari begitu banyak rantai panjang yang ditemukan dalam makanan, seperti: karbohidrat, lemak dan protein.

Hidrokarbon takjenuh

Hidrokarbon disebut takjenuh jika dalam molekulnya terdapat sedikitnya salah satu jenis ikatan karbon-karbon, berupa ikatan ganda (Alkena) dengan rumus molekul C_nH_{2n} , atau triple (Alkuna) dengan rumus molekul C_nH_{2n-2} .

Hidrokarbon takjenuh jauh lebih reaktif daripada hidrokarbon jenuh karena zat semacam hidrogen dan klorin dapat ditambahkan ke dalam ikatan ganda. Reaksi tersebut merupakan reaksi tipikal berupa penambahan satu atom hidrogen ke dalam setiap atom karbon di sepanjang ikatan ganda sehingga mengubah ikatan ganda menjadi ikatan tunggal. Bila ditambahkan hidrogen disebut sebagai hidrogenasi dan bila ditambahkan klorin, maka disebut klorinasi.



Gambar 3.1 Hidrokarbon jenuh - Metana

Revisi dari Vander Hamen Physiology (8th edn). McGraw-Hill, 2001, p.14)

Hidrokarbon aromatik

Hidrokarbon aromatik merupakan keluarga senyawa yang diturunkan dari senyawa benzena (C_6H_6). Benzena atau benzen juga termasuk hidrokarbon, tetapi karena struktur sikliknya dan penyusunan elektronnya, senyawa tersebut tidak menunjukkan perilaku sebagaimana layaknya perilaku hidrokarbon jenuh ataupun takjenuh. Pada hidrokarbon aromatik, terdapat 3 pasang elektron yang tidak menatap sehingga elektron tersebut bebas bergerak dalam lingkaran (perhatikan struktur molekul Benzena). Situasi tersebut mengakibatkan terbentuknya "sircin densitas elektron". Banyak senyawa yang ditemukan dalam tubuh dan digunakan sebagai obat merupakan turunan benzena. Misalnya: fenastren (pewarna, peledak atau sintesis obat), 3,4-benzopirin (karsinogen poten yang berhasil terdeteksi di dalam asap rokok dan kabut polutan), kolesterol (steroid, bahan dasar pembentuk empedu, hormon steroid dan vitamin D, pembentuk plak dalam proses aterosklerosis, disintesis oleh sel-sel hati sebagai salah satu produk metabolisme lemak di dalam tubuh), vitamin D (zat yang digunakan tubuh untuk memproduksi suatu hormon yang disebut 1,25-dihidroksivitamin D, yang memotivulasi usus untuk mengabsorpsi secara aktif Ca), testosteron (hormon yang paling penting dalam tubuh pria), dan progesteron (hormon yang paling penting dalam tubuh perempuan).

Gugus fungsional

Senyawa yang mengandung gugus fungsional khusus, seperti -OH (misalnya metanol dan etanol), ternyata memiliki sifat kimia yang sama akibat keberadaan gugus fungsional tersebut. Ada beberapa kategori senyawa organik dengan gugus fungsionalnya masing-masing, antara lain: alkohol (metanol, gliserol), eter (dimetil eter, asetilkolin), aldehid (metanol atau formaldehid, vanila), keton (aseton, kortisol dan progesteron), asam karboksilat (asam etanoat, asam stearat), ester (metilasetat, lemak hewar, minyak sayur), amina (metilamina, histamin atau dimetilamin) dan asam amino (alanin, glisin).

Molekul organik utama dalam tubuh

Molekul-molekul organik utama yang ada di dalam tubuh (hidrasi adalah karbohidrat (1,0% berat badan), lipid (15,0% berat badan), protein (17,0% berat badan), dan asam nukleat (2,0% berat badan). Adapun atom-atom utama yang menyusun molekul-molekul tersebut serta kelas dan subunitnya dapat dilihat pada tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3.1 Kategori molekul organik utama dalam tubuh

Kategori	NBB	Atom utama	Subklas	Subunit
Karbohidrat	1,0	C, H, O	Monosakarida (Gula)	Monosakarida
			Polisakarida	
Lipid	15,0	C, H	Trigliserida	3 Asam lemak + Glycerol
			Fosfolipid	2 Asam lemak + Glycerol + Fosfat + molekul nitrogen
			Steroid	
Protein	17,0	C, H, O, N	Peptida	Asam amino
			Protein	Asam amino
			DNA	(Adenin, Sitosin, Guanin, atau Timin) + Deoksiribosa + Fosfat
Asam nukleat	2,0	C, H, O, N	RNA	(Adenin, Sitosin, Guanin, atau Urasi) + Ribosa + Fosfat

Karbohidrat

Karbohidrat (KH) hanya mengandung karbon, hidrogen, dan oksigen. Dinamakan karbohidrat karena rasio hidrogen terhadap oksigen adalah 2:1, yang sama dengan rasio pada air. Kata sakarida berarti gula, dan nama gula mempunyai akhiran -osa, misalnya glukosa, dekstrosa, atau fruktosa. Semua karbohidrat mengandung gugus fungsional hidroksil -OH sehingga dikelompokkan kedalam kelompok alkohol.

Karbohidrat, sebelumnya, dikenal sebagai gula alkohol. Sumber utama karbohidrat dalam diet normal manusia adalah sukrosa (gula tebu), laktosa (gula susu) dan zat tepung yang merupakan karbohidrat kompleks, yang dapat ditemukan dalam semua makanan, terutama gandum dan makan yang dibuat dari tumbuhan tersebut, seperti: roti, kue dan sereal. Karbohidrat lain yang dimakan (dalam jumlah yang sangat terbatas) mencakup glikogen, pektin, dan dekstrin; dan beberapa senyawa yang rasio H:O-nya tidak sebesar 2:1, juga dimakan dalam jumlah terbatas yaitu: alkohol, asam laktat, dan asam piruvat.

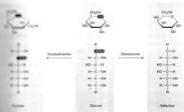
Jenis karbohidrat

Karbohidrat terbagi menjadi tiga kelompok berdasarkan ukuran dan kelarutannya: (1) Monosakarida - satu unit gula dan larut dalam air. Merupakan unit pembangun karbohidrat lainnya; (2) Disakarida - dua unit gula dan larut dalam air dan (3) Polisakarida - banyak unit gula dan tidak larut dalam air.

Monosakarida (gula sederhana). Monosakarida terdapat dalam bentuk rantai terbuka dan bentuk cincin. Kedua bentuk ini dengan mudah saling bertukar bentuk. Di dalam larutan bentuk rantai terbuka menutup dan membentuk struktur cincin yang lebih stabil.

Hanya ada tiga monosakarida yang sering terdapat dalam makanan. Monosakarida tersebut adalah glukosa (gula darah atau dekstrosa), fruktosa (gula buah), dan galaktosa. Ketiganya memiliki

rumus molekul $C_6H_{12}O_6$ dan disebut juga heksosa karena memiliki enam atom karbon. Monosakarida dengan lima atom karbon disebut pentosa, contohnya ribosa dan deoksiribosa.



Gambar 3.2 isomer fruktosa, glukosa dan galaktosa

(diambil dari Anatomy and Physiology [5^{edn}]. McGraw-Hill, 2004, p.44)

Fruktosa, galaktosa, dan glukosa merupakan isomer - memiliki rumus molekul yang sama tetapi rumus strukturnya berbeda (Gambar 3.2). Jadi, ketiganya memiliki sifat kimiawi yang berbeda. Bila struktur glukosa dan fruktosa diamati dengan cermat, maka akan terlihat gugus fungsional yang berbeda. Glukosa mengandung gugus fungsional aldehid dan disebut aldosa. Fruktosa memiliki gugus fungsional keton dan disebut ketosa. Semua monosakarida merupakan gula pereduksi karena mudah bereaksi dengan reagen seperti larutan Benedict dan Fehling. Monosakarida akan mereduksi larutan reagen yang berwarna menjadi merah bata, tes ini digunakan oleh ahli biologi di laboratorium untuk mengidentifikasi gula pereduksi.

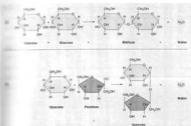
Dulu, larutan Benedict dan Fehling digunakan di rumah sakit untuk mendeteksi glukosa di dalam urin. Glukosa digunakan oleh sel tubuh sebagai sumber energi. Nilai normal glukosa darah adalah 3,5 - 5,5 mmol/L. Pada penyakit seperti diabetes melitus, konsentrasi glukosa darah akan lebih tinggi dari normal - hiperglikemia, dan kelebihan glukosa ini akan diekresi dalam urin (glikosuria). Secara normal, glukosa tidak ada dalam urin.

Saat ini, dengan mudah dapat diuji glukosa dalam urin hanya dengan menggunakan reagen urinalisis berbentuk strip yang akan berubah warna berdasarkan konsentrasi glukosa, misalnya dengan Labstix[®]. Tes darah dapat memberikan pengukuran glukosa darah secara langsung. Sampel darah didapat dengan menusuk ujung jari dan meneteskan darah pada strip reagen dan memasukkannya ke glukometer, misalnya Glucotrend[®] yang menampilkan hasil pengukuran secara digital. Mudah dilakukan. Setiap sampel harus menggunakan strip baru dan instruksi pemakaian harus dibaca sebelum alat ini digunakan. Tangan harus dibasuh hanya dengan air dan sabun, untuk menghilangkan zat-zat seperti alkohol, yang dapat mengganggu pengukuran oleh glukometer.

Monosakarida mengandung banyak gugus fungsional hidroksil (-OH). Gugus hidroksil dapat membentuk ikatan hidrogen dengan air membuat monosakarida larut dalam air. Adanya gugus -OH pada atom karbon dalam molekul juga akan memberikan rasa manis pada gula.

Disakarida. Disakarida yang penting dalam makanan adalah sukrosa (gula meja atau gula tebu), laktosa (gula susu), dan maltosa (gula malt). Laktosa dan maltosa merupakan gula pereduksi, tetapi sukrosa bukan merupakan gula pereduksi. Disakarida terbentuk bila dua monosakarida bergabung dengan melepas satu molekul air dalam reaksi kondensasi (Gambar 3.3).

Ikatan kovalen yang menggabungkan dua unit monosakarida disebut ikatan glikosidik - ikatan ini merupakan gugus fungsional eter.



Gambar 3.3 Disakarida

(diadaptasi dari Fox Human Physiology (8th edn). McGraw-Hill, 2005. p.33)

Disakarida terlalu besar untuk dapat diabsorpsi langsung di usus dan harus dicerna menjadi monosakarida sebelum diabsorpsi. Hal ini terjadi melalui proses hidrolisis (hidro = air, lisis = pemecahan). Hidrolisis merupakan kebalikan dari kondensasi dan melibatkan penambahan air, biasanya dibantu enzim sebagai katalis.

Polisakarida. Polisakarida adalah rantai panjang molekul-molekul gula. Struktur seperti ini disebut polimer atau makromolekul. Polisakarida dapat mengandung hingga 26.000 molekul glukosa dan biasanya tidak larut air karena ukurannya yang besar. Tiga polisakarida yang penting adalah selulosa, pati, dan glikogen.

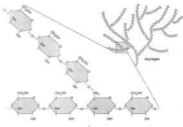
Selulosa (serat)

Selulosa terdapat dalam semua tumbuhan sebagai bagian dari dinding selnya dan merupakan senyawa organik terbanyak di bumi. Selulosa terdiri dari rantai lurus molekul glukosa yang panjang dan tidak dapat dicerna karena manusia tidak memiliki enzim selulase. Selulosa bersifat hidroskopik, yaitu menyerap air sehingga membuat tinja lebih bermassa dan lebih lunak untuk dikeluarkan. Serat yang berlebihan dapat menyebabkan flatulensi (buang gas) karena fermentasi selulosa dan makanan yang tidak tercerna oleh bakteri di usus besar menghasilkan gas seperti metana dan hidrogen sulfida (hidrogen sulfida menyebabkan bau). Diet tinggi serat dapat mencegah kanker usus besar.

Glikogen

Kelebihan glukosa akan disimpan sebagai glikogen (pati hewani) pada manusia dan hewan. Glikogen dapat ditemukan di hati dan otot skelet, dan terbentuk dari banyak molekul glukosa yang saling bertautan dalam rantai-rantai bercabang-cabang. Susunan yang bercabang ini memungkinkan hidrolisis glikogen secara cepat. Sekitar sepertiga cadangan glikogen tubuh terdapat pada hati dan dua pertiga pada otot skelet. Di sel hati (hepatosit) glukosa diubah menjadi glikogen dengan adanya insulin, proses ini disebut glikogenesis. Proses sebaliknya (glikogen menjadi glukosa) disebut glikogenolisis. Dalam tubuh terdapat cadangan karbohidrat yang cukup berupa glikogen untuk persediaan energi satu hari, dan glukosa untuk kebutuhan energi selama satu jam.

Glikogen juga disimpan dalam otot skelet, dan dapat diubah menjadi glukosa oleh enzim fosforilase otot. Glukosa yang dihasilkan di otot dengan cara ini hanya digunakan untuk energi kontraksi otot. Jika cadangan glikogen penuh maka glukosa dapat diubah menjadi lemak dan disimpan di jaringan adiposa.



Gambar 3.4 Glikogen

(Ditinjau dari Fox Human Physiology [8thedn], McGraw-Hill, 2003, p.33)

Pati

Tumbuhan menyimpan kelebihan glukosa sebagai pati - ratusan atau ribuan molekul glukosa yang saling bertautan membentuk rantai yang panjang dan lurus (amilosa) atau bercabang (amilopektin). Pati dan glikogen merupakan zat cadangan yang baik karena tidak terlalu larut dalam air. Molekul pati berakumulasi membentuk granul pati yang terlihat pada banyak sel tumbuhan, misalnya kentang. Karbohidrat merupakan sumber energi pangan yang disukai.

Fungsi Karbohidrat

Adapun fungsi karbohidrat dalam tubuh antara lain: (1) produksi energi; (2) tindakan perlindungan; (3) tindakan penghematan protein; (4) efek anti-ketogenik; (5) sintesis senyawa.

Produksi energi. Fungsi utama karbohidrat (KH) adalah memproduksi energi. Setiap gram KH dapat menghasilkan 16 kilojoule energi dan semua sel hanya dapat menerima KH dalam bentuk monosakarida, yang diubah menjadi energi tersebut. Sel-sel tubuh memerlukan bantuan hormon insulin untuk membantu proses difusi glukosa masuk ke dalam sel, kecuali pada sel-sel otak tidak memerlukan bantuan insulin. Selain itu sel otak hanya menggunakan glukosa sebagai sumber energi. Oleh karena itu, kadar glukosa darah harus dipertahankan agar tidak terjadi kerusakan sel-sel otak.

Glikogen dalam otot jantung merupakan sumber yang sangat penting untuk energi kontraksi (walaupun bukan sumber yang paling penting) terutama jika kebutuhan energi pada jantung tiba-tiba meningkat.

Tindakan perlindungan. Fungsi KH dalam menjalankan tindakan perlindungan adalah dengan berpartisipasi dalam jalur metabolik detoksifikasi khusus di dalam hati, yang akan menurunkan toksisitas beberapa obat dan mengurangi racun. Turunan KH atau produk langsung dari metabolisme KH digunakan untuk membantu menurunkan toksisitas beberapa obat dengan cara mengurangi obat tersebut dan mengikatnya untuk membentuk senyawa baru.

Tindakan penghematan protein. Adanya KH mencegah penggunaan protein yang terlalu banyak untuk memproduksi energi, seperti yang terjadi pada orang yang mengalami kelaparan atau penderita diabetes, sehingga memungkinkan lebih banyak protein digunakan untuk memperbaiki dan membentuk jaringan.

Efek anti-ketogenik. Adanya KH mencegah penggunaan lebih banyak lemak untuk memenuhi kebutuhan energi tubuh yang juga berarti mencegah pembentukan asam berlembih yang dapat merusak tubuh.

Sintesis senyawa. KH berkaitan dengan senyawa makanan lain untuk membentuk senyawa baru yang esensial bagi berbagai proses yang berlangsung dalam tubuh, misalnya asam nukleat yang digunakan untuk membentuk DNA dan RNA untuk mentransmisikan pesan genetik.

Lipid

Lipid, yang dikenal dengan istilah sederhananya lemak, merupakan senyawa berminyak yang tebal dan berat lili pada tubuh. Senyawa ini dicerna oleh tubuh dalam bentuk bahan makanan misalnya, mentega, margarin, daging, telur, susu, kacang dan coklat.

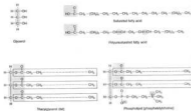
Jika pada suhu kamar, senyawa ini berbentuk cair maka cenderung disebut sebagai minyak, sementara jika berbentuk padat disebut sebagai zat lili. Kotoran telinga (earwax) merupakan salah satu contoh lemak berbentuk padat. Senyawa tersebut tidak menyatu dengan air sehingga disebut hidrofobik yang berarti takut air. Sifat ini sangat penting diketahui dalam memahami cara kerjanya di dalam tubuh, misalnya dalam pembentukan membran sel. Walau tidak larut dalam air, lipid dapat larut dalam solven semacam alkohol, hidrogen dan oksigen, akan tetapi kadar oksigen dalam setiap molekulnya lebih rendah daripada yang dimiliki KH.

Jenis Lipid

Lemak dapat dibagi menjadi lemak sederhana (netral), senyawa lipid dan turunan lipid.

Lemak netral. Lemak netral merupakan sumber terkaya bahan bakar energi dalam tubuh manusia, karena dua kali lebih kaya daripada KH. Di dalam tubuh, senyawa tersebut disimpan dalam bentuk jaringan adiposa. Dua blok kimia pembentuk lemak netral adalah gliserol dan asam lemak. Keduanya juga merupakan blok pembangun kimia dasar untuk lipid lain yang terbentuk dengan sejumlah variasi dan penambahan pada struktur dasar tersebut.

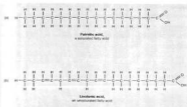
Gliserol merupakan suatu alkohol yang memiliki tiga atom karbon dalam rantainya. Pada masing-masing atom karbonnya melekat satu gugus -OH atau gugus hidroksil. Asam lemak merupakan senyawa yang memiliki rantai lurus atom karbon tempat melekatnya atom yang lain, biasanya atom hidrogen dengan satu gugus asam karboksilat (-COOH) pada salah satu ujungnya. Panjang rantainya bervariasi demikian pula dengan jumlah ikatan gandanya (sampai beberapa derajat) untuk membentuk beberapa jenis asam lemak.



Gambar 3.4 Lemak

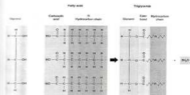
(Disalin dari Vander Human Physiology (8thedn). McGraw-Hill, 2001. p.24)

Jika molekul gliserol berikatan kimia dengan salah satu molekul asam lemak, maka akan terbentuk monogliserida. Jika satu molekul gliserol berikatan kimia dengan dua molekul asam lemak, maka yang terbentuk adalah digliserida. Jika satu molekul gliserol berikatan kimia dengan tiga molekul asam lemak, maka terbentuk trigliserida. Asam lemak yang paling banyak ditemukan dalam tubuh manusia, antara lain: asam stearat (merupakan asam jenuh dengan rantai yang berisi 18 gram karbon), asam oleat (selain memiliki rantai yang berisi 18 karbon juga memiliki satu ikatan ganda di tengah rantai sehingga termasuk asam takjenuh), dan asam palmitat (asam jenuh dengan rantai 16 karbon). Asam di atas dan asam lemak yang sangat serupa merupakan konstituen utama lemak dalam makanan- selain asam yang berada dalam produk susu yang memiliki rantai pendek. Gliserol berikatan kimia dengan asam lemak tersebut untuk membentuk trigliserida yang merupakan lemak yang penting bagi tubuh.



Gambar 3.5 Asam palmitat dan asam linoleik

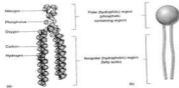
(Disalin dari Fox Human Physiology (8thedn). McGraw-Hill, 2001. p.35)



Gambar 3.6 Pembentukan Trigliserida

(Disalin dari Fox Human Physiology (8thedn). McGraw-Hill, 2001. p.35)

Senyawa lipid. Senyawa lipid terdiri dari gabungan lemak netral dan komponen lainnya. Contohnya adalah fosfolipid (berasal dari lemak netral dan senyawa semacam asam fosfat dan basa nitrogen), glikolipid (berasal dari asam lemak, karbohidrat dan nitrogen) yang ditemukan terutama dalam otak, dan lipoprotein (senyawa lipid dan protein yang ditemukan banyak dalam plasma). Lipoprotein plasma mengandung zat semacam kolesterol, fosfolipid, asam lemak bebas, vitamin yang larut dalam lemak yang ditransport ke seluruh bagian tubuh melalui darah.

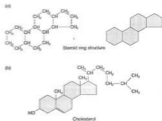


Gambar 3.7 Fosfolipid

(Diadaptasi dari Anatomy and Physiology (10th edn), McGraw-Hill, 2004, p.47)

Turunan lipid. Turunan lipid adalah zat lemak yang diturunkan dari senyawa lemak sederhana. Salah satu contohnya adalah giserol, suatu komponen trigliserida yang larut air yang dapat dengan mudah diubah menjadi karbohidrat sehingga berkontribusi dalam menjaga ketersediaan total glukosa dalam diet. Walaupun kelompok senyawa tersebut dimasukkan ke dalam kelas lipid, strukturnya cukup berbeda dengan struktur lipid yang lain. Contohnya estrogen dan testosteron, merupakan steroid. Steroid mengandung cincin yang saling mengunci, tiga diantaranya mengandung 6 atom karbon sementara cincin keempat

mempunyai 5 karbon. Sisi lain dari rantai menjulur keluar dari cincin dan bentuk alaminya itu akan menentukan sifat steroid tertentu. Steroid lain yang sangat penting adalah kolesterol yang digunakan dalam bentuk asam lemak dalam hati dan bersama zat lain membentuk garam empedu. Garam empedu ini sangat penting dalam proses pencernaan terutama liperti dan absorpsi lemak.



Gambar 3.8 Struktur Steroid dan Kolesterol

(Diadaptasi dari Vander Human Physiology (8th edn), McGraw-Hill, 2001, p.25)

Trigliserida (lemak netral)

Trigliserida merupakan lemak yang ditemukan dalam makanan dan merupakan sumber paling kaya energi yang didapat dari makanan. Trigliserida tersusun dari dua subunit - giserol dan asam lemak. Giserol mengandung gugus fungsional - OH dan merupakan suatu alkohol.

Asam lemak merupakan rantai panjang atom karbon dan hidrogen yang mengandung gugus fungsional asam karboksilat. Karena rantai karbon hidrofobik yang panjang ini, maka lemak tidak larut dalam air. Jika karbon dalam rantai hanya berikatan tunggal (C—C) maka disebut asam lemak jenuh. Jika terdapat ikatan karbon ganda (C=C) maka disebut asam lemak takjenuh.

Semakin banyak ikatan ganda yang terdapat dalam molekul semakin besar kemungkinan asam lemak berbentuk minyak. Asam stearat merupakan lemak jenuh dan dapat dianggap berbentuk silinder lurus yang dapat saling bergabung dengan erat membentuk padatan pada temperatur ruangan. Asam oleat merupakan asam lemak tak jenuh tunggal (mengandung hanya satu ikatan ganda) dan asam arakidonat merupakan asam lemak takjenuh ganda (mengandung banyak ikatan ganda). Asam lemak tak jenuh berbentuk silinder yang melengkung sehingga tidak dapat saling berikatan dan berbentuk cair pada temperatur ruangan.

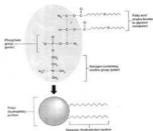
Asam lemak tak jenuh umumnya berasal dari tumbuh-tumbuhan dan berbentuk cair, misalnya minyak zaitun, sedangkan asam lemak jenuh umumnya berasal dari hewan dan berbentuk padat, misalnya mentega.

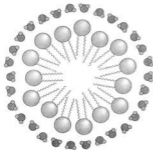
Asam lemak tak jenuh ganda diperlukan untuk pembentukan membran sel dan zat-zat tertentu seperti prostaglandin. Tubuh tidak dapat mensintesis asam lemak ini, sehingga disebut lemak esensial karena harus didapatkan dari makanan.

Trigliserida terbentuk jika tiga asam lemak bergabung dengan satu molekul gliserol disertai pelepasan molekul air untuk membentuk trigliserida berbentuk E. Trigliserida mengandung gugus fungsional ester. Asam lemak pembentuk trigliserida dapat sama atau berbeda. Asam palmitat, oleat, dan stearat menyusun 80% asam lemak pada trigliserida.

Fosfolipid

Fosfolipid memiliki struktur yang sama dengan trigliserida. Perbedaannya adalah fosfolipid hanya mengandung dua asam lemak, dan asam lemak ketiga digantikan oleh gugus yang mengandung fosfor. Fosfolipid memiliki dua area yang berbeda dan dapat ditemukan di membran sel. Karena adanya area polar/nonpolar, maka fosfolipid cenderung untuk tersusun dalam dua lapisan (bilayer). Membran sel fosfolipid memiliki fungsi proteksi dan penting untuk mentranspor zat ke dalam dan ke luar sel.





Gambar 3.9 formasi fosfolipid dalam air

(Diambil dari Fox Human Physiology (8th Edn), McGraw-Hill, 2003, p.37)

Steroid

Steroid merupakan senyawa larut lemak. Rantai-rantai atom yang berbeda menonjol ke luar dari cincin dan sifat rantai ini menentukan bentuk steroid. Steroid yang penting dalam tubuh adalah hormon seks (estrogen dan testosteron), garam empedu, kortikosteroid, dan kolesterol.

Kolesterol merupakan komponen penting membran sel dan digunakan oleh tubuh untuk mensintesis steroid lainnya, misalnya estrogen. Kolesterol tidak larut dalam air dan transporthanya dalam darah

harus terikat pada protein khusus, yang disebut "apoprotein" yang kemudian membentuk lipoprotein. Terdapat tiga kelompok lipoprotein:

- Lipoprotein densitas tinggi (high density lipoprotein, HDL) - sedikit kolesterol yang berikatan dengan sejumlah besar protein. Kolesterol ditranspor ke hati untuk diekresi dalam bentuk HDL.
- Lipoprotein densitas rendah (low density lipoprotein, LDL) dan lipoprotein densitas sangat rendah (very low density lipoprotein, VLDL) — memiliki banyak komponen kolesterol yang berikatan dengan sedikit protein, bentuk ini mentranspor kolesterol ke sel dan jaringan tubuh.

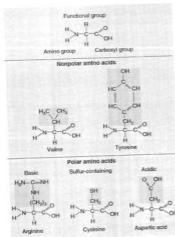
LDL dan VLDL berhubungan dengan terjadinya aterosklerosis (penyempitan pembuluh darah). Aterosklerosis terjadi karena kelebihan kolesterol, fibrin, lipid lainnya, dan kalsium yang akhirnya terdeposit pada dinding pembuluh darah, khususnya arteri koroner, yang membentuk area plak yang disebut ateroma. Plak ini akan mempersempit pembuluh darah dan mengurangi aliran darah. Berbagai penyakit kardiovaskular (penyakit pada jantung dan pembuluh darah) berhubungan dengan kondisi ini, antara lain: penyakit jantung iskemik - infark miokard (serangan jantung), penyakit serebrovaskular - stroke, penyakit pembuluh darah perifer - karena kurangnya oksigen, misalnya nyeri tungkai.

Rasio LDL terhadap HDL yang tinggi (LDL terlalu tinggi) berhubungan dengan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular. Peningkatan kadar kolesterol berhubungan dengan defek produksi LDL yang diturunkan secara genetik, dan gaya hidup - merokok, berat badan berlebih, stres, dan makanan (makan lemak hewani).

Sudah diketahui bahwa rasio HDL terhadap LDL meningkat pada orang vegetarian atau tidak merokok dan orang yang berolahraga.

Protein

Seperti polisakarida, protein merupakan polimer atau makromolekul. Asam amino merupakan satuan pembentuk protein.



Gambar 3.11 Struktur asam amino polar dan asam amino nonpolar

(diadaptasi dari Fox Nutrition Physiology (3rd edn), McGraw-Hill, 2003, p. 29)

Asam amino

Asam amino memiliki dua gugus fungsional yaitu amino - NH₂ dan gugus asam karboksilat - COOH.

Protein yang dimakan akan dicerna menjadi asam amino, yang kemudian diabsorpsi dan digunakan oleh tubuh untuk membentuk protein lainnya. Umumnya terdapat dua puluh asam amino berbeda pada makanan. Dari asam amino ini, 10 asam amino tidak esensial karena dapat dibuat oleh tubuh. Sisanya adalah asam amino esensial karena harus didapatkan dari makanan. Pada anak-anak, tidak seperti orang dewasa, histidin juga merupakan asam amino esensial karena tidak disintesis dalam jumlah cukup untuk dapat memenuhi kebutuhan tubuh.

Jumlah protein pada makanan bervariasi. Jika makanan mengandung semua asam amino esensial maka disebut sebagai protein lengkap, sedangkan jika hanya sedikit mengandung asam amino esensial disebut sebagai protein tidak lengkap. Asam amino yang jumlahnya sedikit dibandingkan kebutuhan disebut juga asam amino terbatas. Secara umum protein hewani seperti daging, telur, dan ikan merupakan sumber protein lengkap. Protein dari tumbuh-tumbuhan cenderung kurang mengandung asam amino tertentu, misalnya pada gandum, lilein merupakan asam amino yang terbatas. Namun demikian, jika seorang vegan atau vegetarian mengonsumsi diet yang bervariasi, maka semua asam amino esensial akan didapat.

Protein, polipeptida, dan dipeptida

Jika dua asam amino saling berikatan melalui ikatan peptida, maka akan terbentuk dipeptida. Polipeptida mengandung 10 atau lebih asam amino yang saling berikatan melalui ikatan peptida. Protein mengandung lebih dari 50 asam amino yang saling berikatan melalui ikatan peptida, akan tetapi sebagian besar protein mengandung beberapa asam amino karena merupakan makromolekul.

Tabel 3.2 Komposisi dan fungsi protein selektif yang ditemukan dalam tubuh

Protein	Banyaknya Polipeptida	Komponen nonprotein	Fungsi
Hemoglobin	4	Pigmen Heme	Mengangkut O ₂
Myoglobin	1	Pigmen Heme	Menyimpan O ₂ dalam otot
Insulin	2	None	Regulasi hormonal metabolisme
Protein darah	1	Karbohidrat	Membentuk jenis-jenis darah
Lipoprotein	1	Lemak	Transpor lipid dalam darah

Setiap protein memiliki jumlah dan urutan asam amino yang spesifik. Perubahan posisi asam amino dalam rantai akan menghasilkan protein baru dengan struktur dan fungsi yang berbeda. Pada anemia sel sabit, struktur hemoglobin hanya sedikit berbeda dari hemoglobin normal yaitu asam amino valin menggantikan asam glutamat pada urutan ke-6 rantai -globin. Hal ini akan mengubah bentuk sel darah merah menjadi bentuk sabit dan menurunkan kemampuannya dalam mengangkut oksigen.

Struktur protein

Di dalam protein terdapat beberapa tingkatan struktur. Struktur primer adalah urutan asam amino dalam rantai. Struktur sekunder dibentuk oleh ikatan hidrogen pada rantai. Jenis struktur sekunder yang paling sering adalah bentuk heliks, contohnya rambut. Pada rambut, ikatan hidrogen mengikat bagian-bagian yang berbeda pada rantai yang sama sehingga memberikan fleksibilitas dan elastisitas struktur. Pada struktur yang lebih jarang, struktur kertas berlipat, ikatan hidrogen mengikat dua rantai berbeda pada sisi-sisinya sehingga strukturnya fleksibel tetapi tidak elastis, contohnya sutra. Struktur tersier terjadi

dari pelipatan rantai-rantai. Hal ini memberikan bentuk yang unik pada protein dan memungkinkannya bekerja secara spesifik, misalnya enzim. Beberapa protein memiliki struktur kuartener, yaitu dua atau lebih rantai polipeptida yang tersusun menjadi protein multisubunit, misalnya hemoglobin yang memiliki empat subunit (dua beta (β) dan dua alfa (α)).

Struktur protein merefleksikan fungsi biologisnya. Protein juga diklasifikasikan menurut bentuknya, yaitu globular, fibrosa atau terkonjugasi.

Protein globular. Kebanyakan protein dalam tubuh, memiliki suatu globular atau suatu bentuk elips sehingga disebut sebagai protein globular. Protein tersebut umumnya larut dalam air atau larutan salin dan melaksanakan ribuan fungsi yang berlainan dalam tubuh. Beberapa contoh penting protein globular antara lain: albumin, globulin, dan fibrinogen yang membentuk plasma protein, demikian pula dengan hemoglobin, sitokrom dan kebanyakan enzim seluler. Protein globular memiliki peran fungsional, bukan struktural, dan dapat dibayangkan seperti segulungan tali berbentuk bulat.

Protein fibrosa. Protein fibrosa mempunyai peran struktural dan terdiri dari rantai-rantai panjang asam amino berpasangan, seperti serat tali, misalnya kolagen atau keratin. Protein ini membentuk protein-protein yang sangat kompleks dalam tubuh manusia. Terdiri dari rantai berikatan peptida yang letaknya sejajar satu sama lain dan banyak diantaranya yang disatukan oleh ikatan silang. Jenis utama, protein fibrosa anatara lain: (1) kolagen, yang merupakan protein struktural jaringan ikat, tendon, kartilago, dan tulang; (2) elastin, yang merupakan serabut elastis pada tendon, arteri dan jaringan ikat; (3) keratin, yang merupakan protein esensial pada rambut dan kuku; (4) aktin dan miosin, protein kontraktile dalam otot. Kesemua protein tersebut sangat kuat dan mampu diregangkan dan dikembalikan lagi ke panjang semula.

Protein terkonjugasi. Banyak protein berikatan dengan zat yang bukan protein untuk membentuk protein terkonjugasi. Antara lain: (1) nukleoprotein, merupakan gabungan antara protein sederhana dengan asam nukleat (RNA atau DNA), misalnya dalam kromosom; (2) proteoglikan, merupakan komponen utama semua jaringan dan bertindak sebagai pelumas pada persendian, dan dalam cairan humor vitreus mata; dan (3) lain-lain, termasuk beberapa jenis protein lain (banyak diantaranya mengandung unsur Mg, Cu, Fe, dan Zn) seperti lipoprotein, glikoprotein, metaloprotein (banyak enzim), kromoprotein (misalnya hemoglobin) dan mukoprotein.

Enzim

Enzim merupakan katalis biologis. Katalis mempercepat kecepatan reaksi tetapi tidak digunakan atau tidak berubah dalam reaksi. Beberapa enzim berupa protein murni, sedangkan enzim lain terdiri dari dua bagian - bagian protein (apoenzim) dan kofaktor. Kofaktor dapat berupa logam seperti besi atau molekul organik seperti vitamin (disebut koenzim). Tidak adanya koenzim dapat menyebabkan berbagai penyakit, misalnya tidak adanya asam folat menyebabkan anemia megaloblastik, tidak adanya tiamin (B₁) menyebabkan beri beri. Enzim dinamakan berdasarkan reaksi yang dikatalisis dan diberi akhiran -ase, contohnya amilase.

Sifat enzim

- Enzim bersifat spesifik dan umurnya hanya mengkatalisis satu jenis reaksi kimia. Zat yang berikatan dengan enzim dan bereaksi disebut substrat. Substrat berikatan dengan sisi spesifik pada permukaan enzim yang disebut lokasi aktif.
- Enzim paling baik bekerja pada temperatur optimum, yaitu pada suhu tubuh 37°C. Temperatur rendah akan memperlambat reaksi. Temperatur tinggi dapat mendenaturasi enzim dengan memecah ikatan hidrogen dalam enzim sehingga enzim tidak lagi dapat bekerja.

- Enzim bekerja paling baik pada pH optimum, yang bervariasi tergantung enzimnya. pH yang ekstrem dapat mendenaturasi enzim.
- Enzim dapat dihambat - racun dapat menempati lokasi yang seharusnya ditempati substrat.

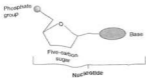
Asam nukleat

Asam nukleat merupakan molekul terbesar yang ditemukan dalam tubuh. Ada dua jenis asam nukleat: (1) asam deoksiribonukleat (DNA) - membawa materi genetik (kromosom) dan menyediakan instruksi sintesis protein; (2) asam ribonukleat (RNA) - diperlukan untuk sintesis protein.

Asam nukleat merupakan polimer dan satuan pembentuknya adalah nukleotida. Setiap nukleotida terdiri dari tiga bagian: (1) gugus fosfat, (2) gula dengan lima karbon, (3) basa yang mengandung nitrogen.

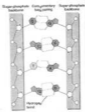
Rantai nukleotida pada molekul asam nukleat saling terikat melalui gugus gula/fosfat (ikatan fosfodiester). Terdapat empat basa yang berbeda pada DNA: adenin (A), sitosin (C), timin (T), dan guanin (G). Adenin hanya dapat membentuk ikatan hidrogen dengan timin, sedangkan sitosin hanya dapat dengan guanin, ini disebut pasangan basa. RNA mengandung urasil (U) sebagai pengganti timin. Urutan pasangan basa inilah yang menentukan kandungan genetik semua makhluk hidup di bumi.

Struktur DNA berbentuk heliks ganda seperti tangga spiral. Gugus gula/fosfat berfungsi sebagai tulang punggung tangga dan ikatan hidrogen basa membentuk anak tangga.



Gambar 3.12 Struktur Nukleotida

(Disalin dari Fox Human Physiology (8th edn), McGraw-Hill, 2003, p.42)



Gambar 3.13 Bentuk struktur asam nukleat

(Disalin dari Fox Human Physiology (8th edn), McGraw-Hill, 2003, p.43)

DNA nucleotides contain

RNA nucleotides contain



Deoxyribose

instead of



Ribose



Thymine

instead of



Uracil

Gambar 3.14 Basa Timin pada DNA dan Basa Urasil pengganti Timin pada RNA

(Disalin dari Fox Human Physiology (8th edn), McGraw-Hill, 2003, p.44)

fungsi protein

Pada garis besarnya beberapa fungsi protein, antara lain:

1. Struktural, yaitu sebagai kolagen (pada ligamen, tulang dan tendon), sebagai keratin (terdapat dalam rambut dan kuku), sebagai elastin (memberikan elastisitas pada ligamen dan pembuluh darah). Struktur proteinnya merupakan protein fibrosa.
2. Pergerakan, yaitu aktin dan miosin sebagai protein kontraktil yang terdapat dalam sel otot. Struktur proteinnya merupakan protein fibrosa.

satu jenis protein penting dalam tubuh adalah enzim yang berfungsi sebagai katalis biologis.

4. Satuan pembentuk asam nukleat adalah nukleotida
5. Karbohidrat dicerna menjadi monosakarida, lemak dicerna menjadi gliserol dan asam lemak, dan protein dicerna menjadi asam amino sebelum diabsorpsi di usus halus.

Soal Latihan

1. Gambarkan struktur aspirin dan identifikasi yang mana gugus fungsional asam karboksilat.
2. Sebutkan minimal 3 enzim yang mencerna protein dan mengapa diekresi dalam bentuk tidak aktif?
3. Jelaskan mengapa mereka yang mengalami intoleransi laktosa masih dapat makan keju dan yogurt?
4. Uraikan apa yang saudara ketahui tentang hormon insulin?
5. Jelaskan mengapa hormon pertumbuhan tidak tersedia dalam bentuk tablet tetapi dalam bentuk sediaan injeksi?
Steroid yang penting dalam tubuh adalah: estrogen, ..., ..., dan kolesterol.
6. Asam deoksiribonukleat (DNA) berfungsi: (1) ..., dan (2) ...sedangkan asam ribonukleat (RNA) diperlukan untuk (3) ...
7. Setiap nukleotida terdiri dari tiga bagian, yaitu: (1) ..., (2) ..., (3) basa yang mengandung ... (4).
8. Terdapat 4 basa yang berbeda pada DNA: (1) ..., (2) ..., (3) ..., dan ... (4).
9. Adenin hanya dapat membentuk ikatan hidrogen dengan: ... (1), sedangkan sitosin hanya dapat dengan ... (2). RNA mengandung urasil (U) sebagai pengganti ... (3). Urutan pasangan basa pada DNA menentukan kandungan ... (4) semua makhluk hidup di bumi.
10. Enzim brush border, seperti: ... (1), ... (2), dan ... (3) memecah ... (4).

Rujukan Lebih Lanjut

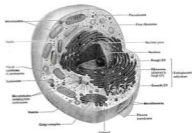
1. *Anatomy and Physiology* (8th edn). McGraw-Hill Co., 2004. p. 27 – 57.
2. *Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 12 – 30.
3. *For Human Physiology*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2003. p. 24 – 45.
4. James, J. Baker, C. Swain, H. 2002. *Prinsip-Prinsip Sains untuk Keperawatan*. Edisi Bahasa Indonesia. Penerbit EMS. h. 58 – 76.

sistem organ pada organisme multiseluler. Berbagai jenis bakteri dapat melakukan fungsi berbeda untuk kepentingan bersama sehingga semuanya dapat selamat di lingkungan yang berbahaya.

Sel prokariotik berbeda dengan virus dan prion. Virus dan prion bukanlah sel. Keduanya bahkan dapat dianggap sebagai suatu benda diantara benda hidup dan benda mati. Virus dan prion membutuhkan sel untuk replikasi. Hampir semua jenis virus dan prion ini berukuran lebih kecil dari sel terkecil. Virus memiliki materi genetik berupa asam ribonukleat (RNA) atau asam deoksiribonukleat (DNA); virus dapat bertahan hidup di luar sel pejamu (cairan ekstraseluler). Dalam cairan ekstraseluler, materi genetiknya diselubungi lapisan protein dan kadang membran. Virus dalam keadaan ini disebut juga partikel virus atau prion. Prion hanya terbuat dari glikoprotein saja dan tidak memiliki asam nukleat. Seperti juga virus, prion dapat berada dalam cairan ekstraseluler. **Sel eukariotik.** Sebagian besar makhluk hidup multiseluler, sel tubuhnya disusun oleh sel eukariotik. Sel ini memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan sel prokariotik (10,0 - 100,0 μm). Sel ini memiliki inti (nucleus) sejati, karena bahan inti telah dibungkus oleh suatu membran. Antara nukleus dengan membran plasma dibatasi oleh medium semi cair yang disebut sitoplasma. Sitoplasma sel eukariotik mempunyai sejumlah organel sel yang masing-masing memiliki fungsi spesifik. Bagian dalam sangat kompleks dengan organel-organel yang dibatasi membran maupun yang tidak dibatasi membran. Organel-organel yang dibatasi membran adalah endoplasmik retikulum, golgi aparatus, mitokondria, lisosom, dan mikrobodies dan inti sel. Organel yang tidak dibatasi membran antara lain: ribosom, mikrotubul, sentriol, flagela, dan sitoskeleton.

Walaupun sel eukariotik mempunyai struktur fundamental yang sama, tetapi dapat dibedakan satu sama lain. Misalnya, sel pada permukaan saluran pernapasan adalah sel bersilia untuk membantu pengeluaran mucus (lendir) dan bentuknya berbeda dengan sel sperma yang merupakan satu-satunya sel manusia yang dapat bergerak.

Berdasarkan bentuk strukturnya, sel tubuh manusia dapat dibedakan antara sel saraf, sel otot rangka, sel otot polos, sel otot jantung, sel trakea, sel kulit, sel tulang, sel darah, sel lemak dan sel sperma.



Gambar 4.2 Sel eukariotik

(Disalin dari Sherwood, L. [2010]. *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA, p. 22).

Sel eukariotik saling berinteraksi. Semua organisme yang kompleks tersusun dari sel-sel dengan cara yang sama seperti rumah yang tersusun dari batu bata. Sel-sel ini terorganisasi menjadi kelompok-kelompok sel dan berinteraksi untuk melakukan berbagai fungsi yang berbeda; sel-sel yang melakukan fungsi yang sama bergabung membentuk jaringan, misalnya jaringan hati tersusun dari sel-sel hati. Beberapa jaringan yang berbeda akan bergabung membentuk organ, misalnya, jantung tersusun

dari jaringan otot dan saraf, bekerja sama sehingga jantung menjadi organ yang mampu memompa darah ke seluruh tubuh.

Sel tubuh manusia

Tubuh manusia mengandung 60 miliar (6×10^{11}) sel dan sekitar dua ratus jenis sel yang berbeda tetapi semuanya memiliki struktur dasar yang sama. Setiap sel memiliki membran plasma yang menutupi sitoplasma. Dalam sitoplasma terdapat banyak organel, dan setiap organel memiliki fungsi spesifik dan vesikel sekretoris. Beberapa organel dibungkus oleh suatu membran, sehingga memisahkan setiap organel tersebut dengan organel lainnya.

Pemisahan organel sangat penting; jika organel tidak dilapisi membran untuk menahan strukturnya, maka sel akan mati. Komunikasi antar organel tetap dapat dilakukan melalui pori khusus pada membrannya untuk menjalankan fungsi kompleks seperti sekresi.

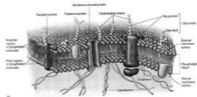
Membran plasma

Kelangsungan setiap sel tergantung pada terpeliharanya isi intrasel yang khas untuk jenis sel tertentu, meskipun komposisi cairan ekstraseluler yang mengelilinginya sangat berubah-ubah. Membran plasma, merupakan lapisan yang sangat tipis, tersusun dari molekul-molekul lemak, protein dan sedikit molekul karbohidrat.

Fungsi membran plasma. Membran plasma ini, berfungsi antara lain: (1) membentuk batas luar setiap sel dan membungkus kandungan intrasel; (2) berperan aktif menentukan komposisi dalam cairan sel dengan cara mengizinkan bahan-bahan tertentu secara selektif masuk ke dalam sel atau dari dalam ke luar sel. Mengontrol masuknya berbagai nutrisi dan keluarnya berbagai produk sekretoris dan bahan sisa; (3) mempertahankan perbedaan konsentrasi ion antara di luar dan di dalam sel; (4) ikut serta menyatukan sel-sel untuk membentuk jaringan dan organ; (5) berperan kunci dalam menentukan kemampuan

komunikasi antar sel (di sini membran plasma sel, merespon perubahan-perubahan, atau sinyal di lingkungan sel). Apapun jenis selnya, fungsi umum membran sel ini sangat penting bagi kelangsungan hidup sel, melalui kemampuannya melakukan aktivitas homeostasis khusus, dan kemampuannya bekerjasama secara terpadu dengan sel lainnya.

Struktur membran. Struktur dasar membran plasma pada semua sel manusia adalah sama. Membran terutama terbuat dari sekelompok molekul fosfolipid dan protein. Dua lapis fosfolipid membentuk lapisan ganda atau sawar hidrofobik (takut air) karena struktur kimianya. Molekul-molekul protein berada di antara lapisan ganda ini dan berperan penting untuk fungsi membran, misalnya membentuk pori atau saluran melalui membran untuk membentuk sistem transpor molekul atau berfungsi sebagai molekul reseptor (Gambar 4.2).



Gambar 4.2 Struktur membran sel

(Diciptakan dari *Anatomy and Physiology* (9^e edisi), McGraw-Hill Co. p.61)

Walaupun struktur membran sel terlihat tetap dan kaku, tetapi molekul molekul tersebut bergerak dan bukan berupa lapisan padat. Konsistensinya lebih mirip minyak goreng daripada lemak padat. Karena hal inilah maka membran sering disebut membran cair (fluida). Sifat

fluiditas ini membantu transpor molekul ke dalam sel dan antar organel. Membran plasma merupakan lapisan ganda lemak yang terbenam dalam protein. Lemak membran yang paling banyak adalah molekul fosfolipid dan kolesterol dalam jumlah yang lebih sedikit. Terdapat milyaran molekul fosfolipid dalam membran plasma setiap sel manusia.

Fosfolipid ini memiliki satu ujung (kepala polar), yang bermuatan listrik, yang mengandung 2 gugus fosfat yang bermuatan negatif dan 2 ekor asam lemak nonpolar. Ujung polar bersifat hidrofilik (menyukai air, karena dapat berinteraksi dengan molekul air), sedangkan ujung nonpolar bersifat hidrofobik (takut air; tidak akan bercampur dengan air). Molekul bersisi dua tersebut menyusun diri membentuk lapisan ganda lemak (phospholipid bilayer), suatu lapisan rangkap molekul-molekul lemak, jika berkontak dengan air. Ekor hidrofobik membenamkan diri di tengah, menjauhi air. Sementara kepala hidrofilik berjajar di kedua sisi dan berinteraksi dengan molekul air.

Fosfolipid yang tidak disatukan oleh ikatan kimia yang kuat dapat berputar cepat serta bergerak di separuh lapisan baglannya. Pergerakan fosfolipid ini menentukan sebagian besar fluiditas (sifat cair) dari membran plasma. Kolesterol juga berperan pada sifat cair serta stabilitas membran. Molekul kolesterol yang berada diantara molekul-molekul fosfolipid untuk mencegah rantai asam-asam lemak menyatu dan mengkristal. Melalui hubungan spesial antara kolesterol dan molekul fosfolipid, molekul kolesterol juga membantu menstabilkan posisi fosfolipid. Sifat cair dari membran plasma, memungkinkan sel berubah bentuk. Membran plasma memiliki integritas struktural sekaligus fleksibilitas. Misalnya, sel otot berubah bentuk ketika berkontraksi; sel darah merah harus mengubah bentuknya ketika melalui kapiler.

Molekul protein membran plasma melekat dipermukaan luar atau dalam dari membran plasma atau menyisipi (membentang) menembus lapisan ganda lemak. Molekul protein yang melekat pada membran plasma ini, melekat melalui interaksi dengan molekul protein yang menembus membran atau melalui perlekatan dengan ke lapis

ganda lemak. Membran plasma memiliki molekul-molekul lemak 50 kali lebih banyak daripada molekul protein. Akan tetapi, molekul protein membentuk hampir separuh dari massa membran karena molekul protein jauh lebih besar daripada molekul lemak. Sifat cair lapisan ganda lemak memungkinkan banyak protein membran menggapung bebas seperti "gunung es" dalam "lautan" lemak yang bergerak, meskipun sitoskeleton membatasi mobilitas protein yang melakukan fungsi khusus di daerah tertentu sel. Membran plasma merupakan suatu model mosaik cair, sebagai rujukan untuk sifat cair membran dan pola mosaik protein-protein yang terbenam di dalam lapisan ganda lemak yang terus menerus berubah.

Sejumlah kecil molekul-molekul karbohidrat, yang ditemukan pada permukaan luar membran plasma, merupakan molekul karbohidrat rantai pendek yang menonjol seperti antena kecil di permukaan luar. Terikat terutama ke protein membran dan sebagian kecil, ke lemak. Kombinasi protein atau lipid dengan karbohidrat ini masing-masing dikenal sebagai molekul glikoprotein dan glikolipid.

Adapun fungsi masing-masing komponen struktur molekul yang menyusun membran plasma adalah sebagai berikut: (1) lapisan ganda lemak memiliki fungsi: membentuk struktur dasar membran plasma, bagian dalamnya yang hidrofobik berfungsi sebagai sawar bagi bahan larut air antara cairan intraseluler dan ekstraseluler, menerbitkan sifat cair membran plasma; (2) glikoprotein, atau glikolipid berfungsi sebagai penanda identitas diri; (3) matriks ekstrasel (MES) berfungsi sebagai lem biologis; (4) protein membran melaksanakan berbagai fungsi membran spesifik; antara lain: kanal atau saluran ion, molekul pembawa atau molekul pengangkut (carrier molecules), akseptor penanda tumbuhan, enzim, reseptor membran, molekul perekat sel (cell adhesion molecule) dan glikoprotein yang berperanan penting untuk kemampuan sel mengenal "diri" dari sel yang sejenis dan dari sel yang berbeda dalam interaksi antar sel.

Nukleus

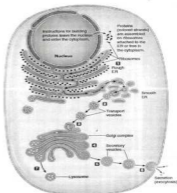
Nukleus atau inti sel merupakan otak sel karena fungsinya mengontrol apa saja yang akan dilakukan oleh sel. Inti sel dilapisi membran ganda atau selubung nukleus. Inti sel merupakan komponen tunggal sel yang paling besar, dapat berupa struktur bulat atau oval yang biasanya terletak di tengah sel (Gambar 4.5)

Membran inti memisahkan inti sel dari sitoplasma sel dan organel-organel sel. Selubung ini mempunyai banyak pori-pori yang memungkinkan lalu lintas antara nukleus dan sitoplasma. Di dalam inti terdapat kromosom, serabut panjang DNA dengan protein yang disebut histon. Setiap kromosom memiliki sentromer yang membagi kromosom menjadi lengan panjang dan lengan pendek. Sentromer penting untuk pemisahan kromosom saat pembelahan sel.

Pada sel manusia terdapat 23 pasang kromosom, jadi totalnya 46 kromosom. Setiap pasang kromosom adalah homolog, yaitu mempunyai ukuran dan bentuk yang sama kecuali kromosom seks, dimana X dan Y berpasangan pada laki-laki, dan XX pada perempuan. Semua kromosom bersama-sama membentuk genom manusia. Saat ini telah diketahui urutan lengkap basa DNA dalam setiap kromosom, tetapi identifikasi dan fungsi semua gen masih diteliti.

Kromosom berisi bahan genetik sel, asam deoksiribonucleat (DNA), yang memiliki 2 fungsi, yaitu: (1) mengarahkan sintesis protein; (2) sebagai cetak biru genetik selama pembelahan sel.

Sintesis protein. DNA mengarahkan sintesis protein sel. DNA inti menyediakan kode (sandi) atau instruksi untuk mengarahkan sintesis protein struktural atau enzimatis tertentu di dalam sel. Caranya adalah menentukan jenis dan jumlah berbagai enzim dan protein lain yang akan diproduksi. DNA inti sel secara tidak langsung mengatur sebagian besar aktivitas sel dan berfungsi sebagai pusat kontrol sel.



Gambar 4.3 Inti sel (nucleus) dan proses sintesis protein

[Dialin dari Sherwood, L. (2010). *Human Physiology: From Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA, p. 260.

Di inti sel terjadi proses penyalinan kode genetik DNA untuk protein tertentu ke dalam molekul RNA perantara (messenger RNA, mRNA). mRNA yang terbentuk di inti sel akan ke luar dari inti sel melalui pori-pori membran inti. Di dalam sitoplasma, mRNA menyalurkan pesan tersebut ke ribosom, yang membaca kode dari mRNA dan menerjemahkannya menjadi rangkaian asam amino untuk membentuk protein yang telah

ditentukan. RNA ribosom (rRNA), yang merupakan komponen esensial ribosom, memindahkan asam-asam amino yang sesuai permintaan di dalam sitoplasma ke tempat (lokasi) yang telah ditentukan pada protein yang sedang dibentuk tersebut. Proses penyalinan DNA untuk gen spesifik menjadi mRNA, yang kemudian ditranspor ke dalam sitoplasma disebut transkripsi.

Pembelahan sel. Pada pembelahan sel, DNA dalam nukleus berduplikasi sehingga setiap sel baru mendapatkan satu set lengkap kromosom. Hal ini dapat terjadi karena struktur sel DNA berupa heliks ganda. Dua molekul panjang DNA yang menyusun setiap kromosom disusun dari perlekatan basa adenine, sitosin, guanine dan timin. Perlekatan ini sangat spesifik, yaitu adenine hanya berpasangan dengan timin dan guanine hanya berpasangan dengan sitosin. Spesifitas pasangan basa ini memungkinkan replikasi DNA atau proses penyalinan kode genetik menjadi proses yang sangat akurat dan memastikan bahwa setiap sel memiliki informasi genetik yang sama. Sebelum replikasi DNA dimulai, dua rantai tersebut harus dipisahkan, sehingga rantai baru dapat disintesis. Pada akhirnya setiap sel baru menerima satu rantai lama dan satu rantai baru DNA. Setelah pembelahan sel, DNA akan terlipin dengan protein histon untuk membentuk dua set kromosom yang dipadatkan yang siap untuk pembelahan sel.

Nukleolus

Dalam sel yang sedang bertumbuh terdapat juga nukleolus atau anak inti, tempat pembentukan subunit ribosom yang diperlukan untuk sintesis protein. Beberapa sel mengandung lebih dari satu nukleolus. Nukleolus merupakan struktur protein sederhana yang mengandung asam ribonukleat dalam jumlah besar, sejenis yang ditemukan pada ribosom. Nukleolus sangat membesar bila sel secara aktif mensintesis protein. Gen-gen dari suatu pasangan kromosom mensintesis asam ribonukleat dan kemudian menyimpannya dalam nukleolus, dimulai dari fibril RNA

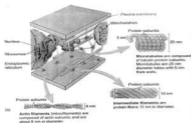
panjang dan kemudian berkondensasi membentuk ribosom granuler. Ribosom granuler selanjutnya bermigrasi melalui pori membrane inti ke dalam sitoplasma tempat sebagian besar dari mereka terikat pada retikulum endoplasma, dan di tempat ini nukleolus memegang peranan penting untuk pembentukan protein.

Sitoplasma

Sitoplasma adalah bagian dalam sel yang tidak ditempati oleh nukleus. Sitoplasma mengandung sejumlah struktur yang jelas, sangat teratur, terbungkus membran – yang disebut organel (“organ kecil”) – yang tersebar di dalam sitosol, yaitu cairan kompleks mirip gel. Pada umumnya, hampir separoh dari volume sel total ditempati oleh organel. Setiap organel adalah suatu kompartemen tersendiri di dalam sel yang terbungkus oleh suatu membran yang mirip dengan membran plasma. Karena itu, isi suatu organel dipisahkan dari sitosol sekitarnya dan dari isi organel lain.

Organel-organel ini mirip pada semua sel, walaupun terdapat beberapa variasi tergantung fungsi khusus masing-masing jenis sel. Organel-organel ini seperti “toko khusus” intrasel. Masing-masing merupakan kompartemen internal yang terpisah dan mengandung seperangkat bahan kimia untuk melaksanakan fungsi tertentu sel. Kompartementalisasi ini menguntungkan karena memungkinkan berlangsungnya berbagai aktivitas kimiawi yang mungkin tidak dapat berlangsung jika aktivitas –aktivitas tersebut berlangsung bersama-sama di dalam sel. Sebagai contoh, enzim yang menghancurkan protein yang tidak dibutuhkan di dalam sel berada di lisosom yang terlindung, tanpa risiko merusak protein sel yang esensial. Seperti halnya setiap organ, melaksanakan suatu fungsi yang esensial bagi kelangsungan hidup tubuh secara keseluruhan, maka masing-masing organel juga melaksanakan aktivitas khusus yang diperlukan untuk kelangsungan hidup organel sel secara keseluruhan.

Bagian sitoplasma yang berada di luar organel-organel tersebut merupakan cairan sel (sitosol). Sitosol dibentuk oleh suatu massa setengah cair seperti gel yang berisi anyaman protein yang dinamai sitoskeleton (Gambar 4.4). Ada banyak reaksi kimia yang tidak saling mengganggu berlangsung di sitosol. Anyaman sitosol menentukan bentuk sel, organisasi internal sel, dan mengatur gerakan sel.



Gambar 4.4 Sitoskeleton – mikrofilamen, filamen intermediet, mikrotubulus

(Diadaptasi dari *Anatomy and Physiology* (8^e edisi). McGraw-Hill Co. p.77)

Sitoskeleton

Sel memiliki bentuk yang jelas. Sitoplasma yang berbentuk seperti gel tidak dapat mempertahankan bentuk yang tetap dari sel. Tepat di bawah membran sel terdapat rangka internal atau sitoskeleton yang terbuat dari batang-batang protein yang disebut aktin dan tubulus yang disebut mikrotubulus. Sitoskeleton ini, dengan membran

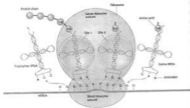
plasma dan matriks ekstraselular (campuran glikoprotein dan protein pada permukaan luar sel) akan memberikan bentuk karakteristik pada sel. Adanya gangguan dari struktur ini akan berpotensi mengancam kehidupan sel; salah satu contohnya adalah distrofi muskular.

Matriks ekstraselular juga membantu sel untuk mengenali sel lain dan mengetahui ada tidaknya benda asing. Hal ini sangat penting untuk fungsi sistem imun dan membantu untuk menjelaskan mengapa kemusnahan golongan darah penting pada transplantasi organ atau transfusi darah.

Beberapa mikrotubulus dapat membentuk silinder yang disebut sentriol tempat silia dan flagela muncul. Sentriol akan merupakan bagian dasar flagela atau silia. Banyak sel tybuh yang bersilia, misalnya sel yang melapisi saluran pernapasan. Sel berflagela seringkali dikaitkan dengan sel yang dapat bergerak bebas, seperti pada manusia, sel sperma mempunyai flagela.

Ribosom

Ribosom adalah tempat sintesis protein. Ribosom terdiri dari subunit kecil dan subunit besar dan terbuat dari RNA ribosom (rRNA) dan protein. Subunit tersebut terdapat bebas dalam sitoplasma dan hanya berkumpul jika terjadi sintesis protein.



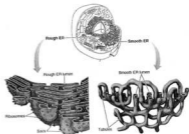
Gambar 4.4 Ribosom – Terdiri dari 2 subunit
 (Disalin dari Vander Hoven Physiology, 8th edn, p. 97).

Subunit besar memiliki dua tempat pengikatan untuk RNA transfer (tRNA). Subunit besar juga memiliki tempat pengikatan membran dan tempat keluarnya protein yang baru terbentuk. Subunit kecil memiliki tempat pengikatan untuk mRNA yang dibentuk di inti sel.

Jika mRNA ke luar dari inti sel, mRNA akan melekat dengan ribosom yang ada pada retikulum endoplasma kasar pada sisi yang menghadap sitoplasma atau pada ribosom bebas dalam sitoplasma. Pada ribosom inilah terjadi *translasi* mRNA menjadi asam amino. Proses ini membutuhkan molekul transfer RNA (tRNA). Molekul tRNA ini bereaksi dengan mRNA melalui antikodon (urutan basa yang berpasangan dengan basa kodon pada molekul mRNA) dan juga asam amino yang tepat.

Artikulum endoplasma (RE)

Retikulum endoplasma (RE) merupakan bagian dari sistem membrane kontinyu yang dibentuk bersama oleh membran inti, retikulum endoplasma, badan Golgi dan beberapa vesikel untuk menyediakan kondisi yang tepat bagi sintesis molekul seluler. Semacam jalur perakitan untuk pembuatan protein (Gambar 4.5).



Gambar 4.5 Struktur retikulum endoplasma (RE)

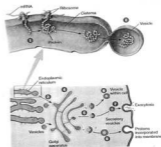
(Disalin dari Sherwood, L. (2012). Human Physiology: from Cells to Systems (7th edn). Brooks/Cole, USA, p. 25).

RE yang dekat inti tersusun dengan lipatan rapat dan terdapat banyak ribosom, sehingga berbentuk kasar dan disebut RE kasar. Semakin jauh dari inti lipatannya menjadi semakin longgar dan tubulunya semakin menjadi lebar dengan ribosom yang melekat semakin jarang, sehingga menjadi lebih halus, disebut RE halus. (Gambar 4.9).

Rupanya, protein yang disintesis tidak hanya berbentuk lurus panjang saja, protein juga harus terlipat menjadi bentuk 3 dimensi agar dapat berfungsi dengan benar. Pembentukan ini terjadi di RE kasar, dimana bila protein tidak terlipat dengan benar akan terdeteksi di RE dan dikeluarkan untuk kemudian dipecah atau didegradasi. Jadi RE kasar, karena banyak mengandung ribosom dan merupakan tempat sintesis protein; sedangkan RE halus tidak mengandung ribosom, bukan menjadi tempat sintesis protein. RE halus justru merupakan tempat sintesis lemak yang ditambahkan dengan protein yang telah dibentuk di RE kasar. Pada bagian RE yang mendekati membran sel, tubulus akan menyempit lagi dan berakhir di vesikel, yang dapat dilepas untuk tranpor ke badan Golgi (Gambar 4.6).

Badan Golgi

Badan Golgi adalah suatu rangkaian membran yang datar. Molekul protein yang masuk di badan golgi diubah untuk dapat melakukan fungsi yang spesifik. Vesikel dan RE akan berfusi pada satu daerah badan Golgi, dimodifikasi dan ditranpor ke daerah lain dan kemudian dilepaskan sebagai vesikel. Vesikel ini dapat segera berfusi dengan membran plasma dan melepaskan isinya (eksositosis) atau dapat disimpan dalam sel untuk dikeluarkan bila sel menerima sinyal, contohnya adalah hormon. Hormon disimpan sebelum dilepaskan.



Gambar 4.7 Struktur Badan Golgi (Golgi apparatus)

(Disalin dari *Anatomy and Physiology* [6th edn]. McGraw-Hill Co. p.82)

Lisosom

Lisosom adalah vesikel (kantong) sederhana yang terbungkus membran, berasal dari RE atau badan Golgi yang mengandung enzim-enzim hidrolitik yang kuat, berfungsi mengurai senyawa-senyawa toksik yang masuk ke dalam sel. (Gambar 4.11). Juga mampu mencerna, dengan demikian, menyingkirkan berbagai sisa sel dan benda asing yang tidak diinginkan, seperti bakteri yang masuk ke dalam sel. Dengan demikian lisosom berfungsi sebagai sistem pencernaan intrasel.

Rata-rata sebuah sel memiliki sekitar tiga ratus lisosom. Tidak seperti organel-organel lain yang strukturnya cenderung uniform, bentuk dan ukuran lisosom bervariasi, tergantung isi yang mereka cerna.

Biasanya lisosom merupakan badan yang berukuran kecil (diameter: 0,2 – 0,5 μm) berbentuk oval atau sferis yang tampak berbetuk granuler apabila tidak aktif. Granula granula tersebut merupakan agregat-agregat protein enzim-enzim penemuan kuat yang ada di dalamnya. Membran disekitarnya yang membungkus enzim-enzim tersebut biasanya mencegah enzim-enzim tersebut agar tidak merusak sel tempat mereka berada. Baik membran maupun enzim-enzim tersebut berasal dari kompleks Golgi.

Bahan ekstrasel yang akan dihancurkan oleh enzim-enzim lisosom dibawa ke bagian dalam sel melalui proses endositosis. Enzim-enzim ini dapat dengan aman menghancurkan bakteri atau bahan lain yang terperangkap di dalam vesikel tanpa merusak bagian sel lainnya.

Enzim-enzim hidrolitik umumnya menguraikan bahan yang ditelan menjadi produk-produk seperti asam amino, glukosa, dan asam lemak yang dapat digunakan oleh sel. Produk-produk besukuan kecil ini siap menembus membrane lisosom untuk masuk ke dalam sitoplasma untuk digunakan kemudian. Lisosom yang telah menyelesaikan aktivitas pencernaannya dikenal sebagai badan residual. Biasanya bahan-bahan yang tidak dicerna yang tertinggal di dalam badan residual akhirnya dikeluarkan dari sel melalui proses eksositosis. Walaupun jarang, bahan-bahan tersebut dapat juga tertahan dan menumpuk di dalam sel seiring dengan penuaan sel.

Lisosom dapat bergabung dengan organel-organel yang sudah tua atau rusak untuk menyinkronkan bagian-bagian sel yang tidak berguna. Pencernaan diri yang selektif ini memungkinkan pergantian bagian-bagian sel yang baru. Semua organel dapat diperbaharui. Apabila seluruh sel mengalami kerusakan yang berat atau mati, lisosom akan pecah dan melepaskan enzim-enzim destruktifnya ke dalam sitosol, sehingga sel mencerna dirinya sampai tuntas.

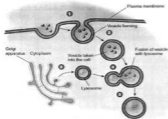
Disebabkan besar jaringan, pembersihan sebuah sel nonfungsional memungkinkan terbentuknya sel baru yang sehat melalui

proses pembelahan sel. Walaupun demikian, pada jaringan yang tidak dapat melakukan pembelahan sel, misalnya jantung dan otak, jaringan parut menggantikan sel-sel yang mati tersebut.

Pada keadaan tertentu, lisosom menyebabkan penghancuran diri sel sehat secara sengaja. Hal ini terjadi sebagai bagian normal pada perkembangan masa mudiah sewaktu jaringan-jaringan tertentu yang tidak diinginkan terbentuk, diprogramkan untuk dihancurkan. Sebagai contoh, duktus-duktus embrionik yang mampu membentuk saluran reproduksi pria dan dengan sengaja dihancurkan selama perkembangan janin wanita. Lisosom juga berperan penting dalam regresi jaringan, misalnya selama reduksi lapisan uterus yang normal terjadi setelah kehamilan. Mekanisme yang mengontrol aktivitas lisosom dalam keadaan-keadaan tersebut belum diketahui.

Suatu bahaya inheren bahkan pada sel yang sehat dan utuh adalah pecahnya membran lisosom tanpa sengaja. Karena organel ini memiliki kemampuan untuk merusak sel sendiri, para penemunya member nama "kantong busuh diri". Walau demikian, terdapat dua faktor yang menyebabkan bahaya ini tidak seberat yang dibayangkan. Pertama, enzim-enzim hidrolitik lisosom bekerja optimal pada suasana asam. Membran lisosom mengangkut ion-ion hydrogen (pembentuk asam) ke dalam lisosom, sehingga bagian dalam lisosom lebih asam daripada yang lainnya. Apabila secara tidak sengaja terjadi kebocoran ke sitosol, enzim-enzim tersebut menjadi kurang poten dibanding dengan kekuatannya pada suasana asam. Kedua, umumnya sel masih dapat mentoleransi kerusakan terbatas yang terjadi jika hanya satu atau dua lisosom yang secara tidak sengaja pecah, karena sebagian besar organel sel dapat diperbaharui. Bahaya terbesar adalah pencernaan molekul DNA yang tidak dapat digantikan yang ada dalam nukleus. Kerusakan nukleus seperti ini akan mengubah sifat genetic sel, dan defek tersebut akan diwariskan kepada semua keturunan sel tersebut.

Kadang-kadang dijumpai individu yang tidak mampu mensintesis satu atau lebih enzim-enzim lisosom. Akibatnya, terjadi penimbunan masif di dalam lisosom senyawa spesifik yang dalam keadaan normal dicerna oleh enzim yang hilang tersebut. Gangguan seperti ini sering menimbulkan manifestasi klinis karena lisosom yang membesar akan mengganggu aktivitas sel normal. Sifat dan keparahan gejala bergantung pada jenis bahan yang tertimbun, yang pada gilirannya bergantung pada enzim lisosom apa yang hilang. Salah satu diantara penyakit golongan ini adalah penyakit Tay-Sachs, yang ditandai oleh adanya penimbunan abnormal senyawa golongan gangliosida, yaitu molekul kompleks yang ditemukan di sel-sel saraf. Gejala-gejala berupa degenerasi sistem saraf yang progresif yang ditemukan terjadi akibat berlanjutnya proses penimbunan tersebut.



Gambar 4.8 Aksi Lisosom

(Dialin dari *Anatomy and Physiology* (5^e edn), McGraw-Hill Co. p.83)

Bahan-bahan ekstrasel yang akan diserang oleh enzim lisosom dibawa ke dalam sel melalui proses fagositosis, sejenis proses endositosis. Endositosis dapat dilaksanakan dengan tiga cara, yaitu: (1) pinositosis, (2) endositosis yang diperantarai reseptor, dan (3) fagositosis. Tergantung pada isi bahan yang diinternalisasi. **Peroksisom**

Di dalam sebuah sel biasanya terdapat beberapa ratus peroksisom kecil berukuran sekitar sepertiga sampai separuh dari ukuran rata-rata lisosom. Peroksisom serupa dengan lisosom, yaitu sama-sama merupakan kantong yang mengandung enzim-enzim. Namun tidak seperti lisosom, yang mengandung enzim-enzim hidrolitik, peroksisom menyimpan beberapa enzim oksidatif kuat dan mengandung sebagian besar katalase sel. Enzim oksidatif menggunakan oksigen untuk mempreteli hidrogen pada molekul-molekul tertentu. Reaksi seperti ini penting untuk mendetoksifikasi berbagai zat sisa yang dihasilkan di dalam sel atau senyawa asing yang masuk ke dalam sel, misalnya etanol yang terdapat di dalam minuman beralkohol. Produk utama yang dihasilkan di peroksisom adalah hidrogen peroksida (H_2O_2), yang dibentuk dari oksigen molekuler dan atom hidrogen yang berasal dari zat-zat sisa.

Hidrogen peroksida merupakan oksidan kuat, memiliki potensi merusak apabila dibiarakan tertimbun atau keluar dari bungkus peroksisomnya. Walaupun demikian, peroksisom juga mengandung banyak katalase, suatu enzim antioksidan yang menguraikan H_2O_2 dan O_2 yang tidak berbahaya. Reaksi yang terakhir ini merupakan mekanisme pengamanan yang penting untuk menghancurkan peroksida yang dapat mematikan di tempat pembentuknya, sehingga mencegah kemungkinan lolosnya senyawa itu ke dalam sitosol.

Mitochondria

Semua reaksi dalam sel membutuhkan energi (dalam bentuk ATP). Energi yang dibutuhkan diproduksi di mitokondria melalui fosforasi oksidatif. Jumlah mitokondria dalam sel tergantung dari aktivitas sel,

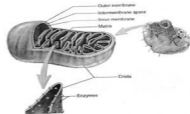
misalnya sel hati memiliki 1000 mitokondria, sel otot memiliki lebih banyak lagi, tetapi sel ragi hanya memiliki dua.

Mitokondria memiliki dua membran, yaitu membran dalam dan membran luar. Membran dalam yang terlipat-lipat ke dalam, membentuk rangkaian lipatan-lipatan dikenal sebagai krista. Krista menonjol ke rongga bagian dalam yang berisi larutan yang mirip gel, yang dikenal sebagai matriks. Krista-krista ini mengandung protein-protein penting (protein transpor elektron) yang berperan dalam mengubah sebagian besar energi yang terkandung dalam makanan menjadi suatu bentuk energi ATP yang dapat langsung digunakan. Membran luar memiliki pori yang cukup besar untuk melepaskan ATP ke dalam sitoplasma sebagai sumber energi untuk berbagai aktivitas sel.

Adanya lipatan-lipatan membran bagian dalam ini sangat membantu memperluas permukaan daerah yang dapat ditempati protein-protein transpor elektron yang berperan pada proses fosforilasi oksidatif di mitokondria. Sementara itu, matriks yang mengisi krista terdiri dari campuran pekat ratusan enzim yang berbeda-beda (enzim-enzim siklus Krebs), yang penting untuk mempersiapkan molekul-molekul nutrisi untuk dapat diangkut oleh protein-protein transpor di krista-krista membran bagian dalam untuk membentuk adenosin trifosfat (ATP) melalui fosforilasi oksidatif.

Oleh karena itu mitokondria dianggap sebagai organel energi sel atau pembangkit tenaga untuk sel. Organel ini mengambil energi dari zat-zat gizi atau nutrisi dalam makanan dan mengubahnya menjadi suatu bentuk energi yang dapat digunakan langsung untuk menjalankan aktivitas sel, yaitu suatu bentuk energi kimia berupa ikatan fosfat berenergi tinggi yang dikenal sebagai ATP, yang terdiri dari adenosine dengan tiga gugus fosfat yang melekat padanya. Ketika ikatan fosfat ke adenosin diputuskan, maka sejumlah besar energi dilepaskan atau dibebaskan. Jadi, untuk memperoleh energi yang dapat segera digunakan, sel memutuskan ikatan fosfat terminal pada ATP, sehingga ATP terurai menjadi

ADP (adenosine di fosfat) dan fosfat inorganik (Pi) serta dilepaskannya sejumlah energi untuk dipergunakan pada berbagai aktivitas sel. Dapat dituliskan sebagai berikut: $ATP \rightarrow ADP + P_i + \text{energi}$ untuk digunakan langsung oleh sel. Makanan ibarat bahan bakar mentah, sedangkan ATP bahan bakar yang telah disuling untuk mengoperasikan perangkat-perangkat sel.



Gambar 4.9 Struktur mitokondria

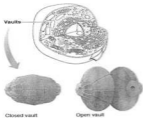
(Diadaptasi dari *Anatomy and Physiology* (6^e edn). McGraw-Hill Co. p.84).

Pada beberapa jenis sel, mitokondria terkemas kompak di bagian-bagian sel yang paling banyak menggunakan energi, misalnya di unit kontraktif otot jantung dan otot rangka.

Mitokondria mengandung DNA yang diwariskan dari pihak ibu. Bila DNA mitokondria mengalami mutasi atau defek, maka dapat berekspresi sebagai suatu penyakit berupa kelemahan otot.

Vault

Selain organel yang telah dikenal, pada awal tahun 1990-an para peneliti mengidentifikasi suatu organel baru yaitu vault, sebagai truk (kendaraan transportasi) sel. Vault berukuran tiga kali lebih besar daripada ribosom, berbentuk seperti tong oktogonal (Gambar 4.13).



Gambar 4.10 Vault –Truk Sel

[Disalin dari Sherwood, I. (2010). *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA, p. 43].

Dinamai vault karena penemunya menemukan adanya banyak lengkung yang menyerupai atap Katedral atau Kubah. Seperti tong, vault memiliki interior yang berongga. Kadang-kadang tampak dalam keadaan terbuka atau tertutup. Sebuah sel dapat memiliki ribuan vault. Organel ini tidak terlihat dengan teknik pewarnaan biasa. Itulah salah satu alasan mengapa organel ini baru ditemukan. Diduga berfungsi sebagai alat transportasi sel (truk sel) dari nukleus ke sitoplasma.

Tabel 4.1 Ringkasan Struktur dan Fungsi Sel

Bagian Sel	Struktur	Fungsi
Membran plasma nukleus	Lapisan ganda lemak yang dilindungi oleh protein dan sejumlah kecil karbohidrat	Sebagai sawar selektif antara isi sel dan cairan ekstrasel, mengontrol lalu lintas bahan ke luar masuk sel
Nukleus	DNA dan protein khusus yang terbungkus oleh membran rangkap	Sebagai pusat kontrol sel, menyimpan informasi genetik; DNA nukleus mengandung kode untuk sintesis protein struktural dan enzim serta berfungsi sebagai cetak biru bagi pembelahan atau replikasi sel.
Organel sitoplasma		
Retikulum endoplasma	Anyaman tubulus dan kantong oval berisi cairan yang ekstrasel, kantung, dan terbungkus membran, sebagian ditutupi oleh ribosom	Membentuk membran sel baru dan komposisi sel lain serta membuat produk untuk sekresi
Kompleks Golgi	Rangkaian kantong membranosa oval yang bertumpuk-tumpuk	Memodifikasi, mengemas, dan mendistribusikan protein yang baru terbentuk
Lisosom	Kantong membranosa yang mengandung enzim hidrolitik	Sebagai sistem pencernaan sel, untuk menghancurkan bahan asing dan sisa sel
Peroksisom	Kantong membranosa yang mengandung enzim oksidatif	Melaksanakan detoksifikasi aktivitas
Mitokondria	Struktur bulat atau oval yang dibungkus oleh dua lapis membran. Membran dalam membentuk krista yang menonjol ke matriks interior	Sebagai organel energi, tempat utama pembentukan ATP, mengandung enzim untuk siklus asam sitrat dan rantai transfer elektron
Vault	Berbentuk seperti tong berbagian berongga	Diduga sebagai truk sel untuk transport dari nukleus ke sitoplasma
Bagian sitosol yang berbentuk gel		
Enzim-metabolisme intermediet	Tersebar di dalam sitosol	Mempromosikan reaksi intrasel yang melibatkan pengisian, sintesis, dan transformasi molekul organik kecil.
Ribosom	Granula RNA dan protein-protein yang melekat ke retikulum endoplasma kasar, sebagian bebas dalam sitoplasma	Sebagai "mesin kerja" bagi sintesis protein.

Bagian Sel	Struktur	Fungsi
Veikel transport, sekretoris, dan endositotik	Berbentuk sementara berisi produk yang disintesis atau diolah oleh sel dan dibungkus membran	Menginduskan dan atau menyimpan produk di dalam ke luar, atau dari luar masuk sel
Badan inklusi	Granula glikogen, butiran lemak	Menyimpan kelebihan nutrisi
Bagian Sitoskeleton		
Mikrotubulus	Tubung panjang berongga yang panjang dan terdiri dari molekul-molekul tubulin	Mempertahankan bentuk asimetrik sel dan mengkoordinasikan gerakan kompleks sel. Struktur ini mempermudah transport vesikel sekretoris di dalam sel, sebagai komponen struktural dan fungsional utama untuk silia dan flagela, membentuk gelembung mitosis selama pembelahan sel.
Mikrofilamen	Buntar heliks molekul-molekul aktin yang saling pilin; mikrofilaria yang terdiri dari molekul miosin juga terdapat di sel otot.	Sebagai bagian dari sistem kontraksi sel, berinteraksi kontraksi otot dan gerakan amoeboid; berfungsi sebagai penggerak mekanis untuk mikrovilia
Filamen intermedial	Protein berbentuk benang inguler	Membantu sel menahan stres mekanis

(Disalin dari Sherwood, L. (2010). *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA, p. 44).

Ringkasan

1. Semua organisme tersusun dari sel-sel, ada organisme uniseluler (bersel tunggal), seperti bakteri. Organisme multiseluler disusun oleh sel-sel yang terorganisir secara struktural dan fungsional, sel membentuk berbagai jaringan, menjadi organ-organ, dan selanjutnya membentuk sistem-sistem, dan akhirnya organisme multiseluler (manusia).
2. Sel prokariotik berbeda dengan prion dan virus tidak mempunyai membran atau dinding sel, prion dan virus bukan sel. Sel prokariotik berbeda dengan sel eukariotik, karena sel prokariotik belum mempunyai inti, mempunyai dinding sel membungkus membran plasma, dan pada umumnya merupakan organisme

uniseluler, sedangkan sel eukariotik sudah mempunyai inti sejati, tidak mempunyai dinding sel, selain membran plasma, menyusun sistem organisme multiseluler.

3. Struktur sel manusia terdiri dari: membran plasma, inti sel dan sitoplasma yang didalamnya terdapat organ-organ antara lain: retikulum endoplasma, ribosom, badan Golgi, peroksisom dan sitoskeleton.
4. Berdasarkan bentuk strukturnya sel saraf, sel otot polos, otot jantung, otot rangka, sel kulit, sel darah, sel lemak, dan sel sperma dapat dibedakan satu sama lainnya.
5. Inti sel terdiri dari DNA dan protein khusus yang terbungkus oleh membran rangkap; berfungsi sebagai pusat kontrol sel, menyimpan informasi genetik; DNA nukleus mengandung kode untuk sintesis protein struktural dan enzim serta berfungsi sebagai cetak biru bagi pembelahan atau replikasi sel.
6. Membran plasma adalah lapisan ganda lemak yang dilengkapi oleh protein dan sejumlah kecil karbohidrat yang lapisan ganda lemak yang dilengkapi oleh protein dan sejumlah kecil karbohidrat.
7. Retikulum endoplasma merupakan anyaman tubulus dan kantung oval berisi cairan yang eksternal, konya, dan terbungkus membran, sebagian ditutupi oleh ribosom; berfungsi membentuk membrane sel baru dan komponen sel lain serta membuat produk untuk sekresi.
8. Ribosom merupakan granula RNA dan protein-protein yang melekat ke retikulum endoplasma kasar, sebagian bebas dalam sitoplasma; berfungsi sebagai "meja kerja" sintesis protein.
9. Kompleks Golgi merupakan rangkaian kantong membranosa oval yang bertumpuk-tumpuk; berfungsi memodifikasi, mengemas dan mendistribusikan protein yang baru terbentuk.
10. Lisosom merupakan kantong membranosa yang mengandung enzim hidrolitik; berfungsi sebagai sistem pencernaan sel, untuk menghancurkan bahan asing dan sisa sel.

- Peroksisom adalah kantong membranosa yang mengandung enzim oksidatif; berfungsi melaksanakan aktivitas detoksifikasi.
- Mitokondria merupakan struktur bulat atau oval yang dibungkus oleh dua lapis membrane; berfungsi sebagai organer energi, tempat utama pembentukan ATP, mengandung enzim untuk siklus asam sitrat dan rantai transpor elektron.
- Mikrotubulus merupakan tabung panjang berongga yang panjang dan terdiri dari molekul-molekul tubulin; berfungsi mempertahankan bentuk asimetrik sel dan mengkoordinasikan gerakan kompleks sel, khususnya mempermudah transpor vesikel sekretorik di dalam sel, berfungsi sebagai komponen struktural dan fungsional utama untuk silia dan flagela, serta membentuk gelendong mitotik selama pembelahan sel.
- Mikrofilamen merupakan rantai heliks molekul-molekul aktin yang saling pilir; mikrofilamen yang terdiri dari molekul miosin juga terdapat di sel otot; berfungsi sebagai bagian dari sistem kontraktif sel, termasuk kontraksi otot dan gerakan amuboid; berfungsi sebagai pegas mekanis untuk mikrovilus.
- Mikrofilamen merupakan rantai heliks molekul-molekul aktin yang saling pilir; mikrofilamen yang terdiri dari molekul miosin juga terdapat di sel otot; berfungsi sebagai bagian dari sistem kontraktif sel, termasuk kontraksi otot dan gerakan amuboid; berfungsi sebagai pegas mekanis untuk mikrovilus.

Soal Latihan

- Jelaskan perbedaan antara sel manusia dan sel bakteri.
- Jelaskan mengapa prion dan virus tidak disebut sel.
- Mengapa membrane harus memiliki struktur yang cair?
- Bandingkan antara lisosom dan peroksisom.

- Bedakan antara enzim oksidatif yang ditemukan pada mitokondria dan yang ditemukan pada peroksisom.
- Sebutkan dan jelaskan fungsi masing-masing komponen sitoskeleton.
- Endositosis dapat dilaksanakan dengan tiga cara, yaitu: (1) ... (2) ... dan (3) ...
- Matriks ekstraselular juga membantu sel untuk ... sel lain dan mengetahui ... benda asing.
- Diduga sebagai anlar transport antara nukleus dengan sitosol adalah:

A. Vault	D. Lisosom
B. Sitokrom	E. Peroksisom
C. Mikrofilamen	
- Membantu sel menahan stress mekanik:

A. Vault	D. Filamen intermediate
B. Sitokrom	E. Peroksisom
C. Mikrofilamen	

Bacaan Lebih Lanjut

- Anatomy and Physiology* (6th edn). McGraw-Hill Co., 2004. p. 58 – 99.
- For Human Physiology* (8th edn). McGraw-Hill Co., 2003. p. 50 – 80.
- Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia. p. 11 – 40.
- James, J. Baker, C. Swain, H. 2002. *Prinsip-Prinsip Sains untuk Keperawatan*. Edisi Bahasa Indonesia. Penerbit EMS. h. 77 – 91.
- Sherwood, L. (2010). *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA. p. 19 – 51.
- Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 39 – 52.

BAB 5

Pengawasan Genetik Fungsi Sel

Sasaran Pembelajaran:

Pada akhir bab ini pembaca akan mampu untuk:

1. Menjelaskan tentang asam nukleat yang berperan dalam proses sintesis protein sel tubuh.
2. Menjelaskan perbedaan struktur dan fungsi antara DNA dan RNA.
3. Menguraikan berbagai komponen penyusun nukleotida.
4. Menguraikan seluruh rangkaian proses sintesis protein dari inti sel sampai sitoplasma.
5. Menjelaskan tentang siklus sel dan proses pembelahan sel secara mitosis dan meiosis.
6. Menjelaskan bagaimana peranan gen dalam mengawasi proses pembelahan dan pertumbuhan sel.

Hampir setiap orang mengetahui bahwa gen mengawasi hereditas dari orang tua ke anaknya, tetapi sebagian besar orang tidak menyadari bahwa gen yang sama mengawasi reproduksi dan fungsi semua sel sehari-hari. Gen mengawasi fungsi sel dengan menentukan zat yang akan disintesis di dalam sel, yaitu: struktur apa, enzim apa dan zat kimia apa yang akan disintesis. Gen juga mengawasi pembelahan sel, dimana DNA dalam nukleus berduplikasi sehingga setiap sel baru mendapatkan satu set lengkap kromosom.

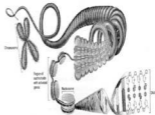
Sintesis Protein

Ada tiga gen, yang merupakan asam nukleat dinamakan asam deoksiribonukleat (DNA), secara otomatis mengawasi pembentukan

asam nukleat lainnya, yaitu asam ribonukleat (RNA) yang menyebar ke seluruh sel untuk mengawasi pembentukan protein spesifik. Sebagian protein yang terbentuk adalah protein struktural yang berhubungan dengan berbagai lipid untuk membentuk struktur organel. Sejalan ini sebagian besar adalah protein enzim yang berfungsi sebagai katalisator berbagai reaksi kimia dalam sel. Misalnya, enzim yang mengaktifkan semua reaksi oksidatif yang mensuplai energi pada sel, dan mereka mengaktifkan sintesis berbagai zat kimia seperti lipid, glikogen, adenosin trifosfat dan sebagainya.

Gen

Ada sekitar 100.000 jenis gen pada sel manusia terkandung dalam molekul DNA panjang, berutas ganda, heliks yang mempunyai berat molekul yang biasanya diukur dalam jutaan. Suatu segmen yang sangat pendek dari molekul DNA terdiri dari beberapa senyawa kimia sederhana yang disusun dalam bentuk teratur.

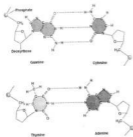


Gambar 5.1 Molekul DNA pada kromosom

(Diadaptasi dari Fox Human Physiology (9th edn), McGraw-Hill Co., 2003, p. 63).

Berik dasar pembentuk DNA.

Senyawa kimia dasar yang terlibat dalam pembentukan DNA, meliputi: (1) asam fosfat, (2) gula yang disebut deoksiribosa, (3) empat basa nitrogen, adenin (A), guanin (G), timin (T) dan sitosin (S). Asam fosfat dan deoksiribosa membentuk dua utas heliks DNA, serta basa terletak di antara utas dan menghubungkannya.



Gambar 5.2 Bahan dasar pembentuk DNA

(Diadaptasi dari Fox Human Physiology, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2003, p. 43).

Nukleotida. Tingkat pertama pembentukan DNA adalah penggabungan satu molekul asam fosfat, satu molekul deoksiribosa dan salah satu dari empat basa untuk membentuk nukleotida. Jadi, dibentuk empat nukleotida terpisah, masing-masing mengandung salah satu dari empat basa: asam adenilat, timidilat, guanilat dan sitidilat. Nukleotida dibagi dalam 2 pasangan komplementer, yaitu: (1) asam adenilat dan asam timidilat membentuk suatu pasangan, dan (2) asam guanilat dan asam

imidilat membentuk pasangan lain. Basa tiap-tiap pasang dapat berikatan dengan satu-sama lain dengan ikatan hidrogen. Jadi membentuk dua utas heliks DNA yang saling berikatan.

DNA nucleotides contain

RNA nucleotides contain



Deoxyribose

instead of



Ribose



Thymine

instead of



Uracil

Gambar 5.3 Perbedaan molekul nukleotida pada DNA dan RNA

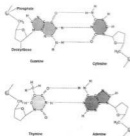
(Diadaptasi dari Fox Human Physiology, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2003, p. 44).

Tabel 5.1 Perbandingan komposisi DNA dan RNA

Komposisi	DNA	RNA
Gula Nukleotida	Deoksiribosa	Ribosa
Basa Nukleotida		
Purin	Adenin Guanin	Adenin Guanin
Pyrimidin	Sitosin Timin	Sitosin Urasil
Banyaknya	Dua	Satu

Berikas dasar pembentuk DNA.

Senyawa kimia dasar yang terlihat dalam pembentukan DNA, meliputi: (1) asam fosfat, (2) gula yang disebut deoksiribosa, (3) empat basa nitrogen, adenin (A), guanin (G), timin (T) dan sitosin (S). Asam fosfat dan deoksiribosa membentuk dua utas heliks DNA, serta basa terletak di antara utas dan menghubungkannya.



Gambar 5.2 Bahan dasar pembentuk DNA

(Ditulis dari Fox Human Physiology, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2003, p. 41).

Nukleotida. Tingkat pertama pembentukan DNA adalah penggabungan satu molekul asam fosfat, satu molekul deoksiribosa dan salah satu dari empat basa untuk membentuk nukleotida. Jadi, dibentuk empat nukleotida terpisah, masing-masing mengandung salah satu dari empat basa: asam adenilat, timidilat, guanilat dan sitidilat. Nukleotida dibagi dalam 2 pasangan komplementer, yaitu: (1) asam adenilat dan asam timidilat membentuk suatu pasangan, dan (2) asam guanilat dan asam

sitidilat membentuk pasangan lain. Basa tiap-tiap pasang dapat berikatan longgar satu-sama lain dengan ikatan hidrogen. Jadi membentuk dua utas heliks DNA yang saling berikatan.

DNA nucleotides contain



Deoxyribose

RNA nucleotides contain



Ribose

instead of



Thymine

instead of



Uracil

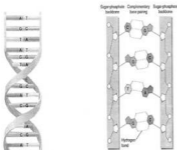
Gambar 5.3 Perbedaan molekul nukleotida pada DNA dan RNA

(Ditulis dari Fox Human Physiology, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2003, p. 44).

Tabel 5.1 Perbandingan komposisi DNA dan RNA

Komposisi	DNA	RNA
Gula Nukleotida	Deoksiribosa	Ribosa
Basa Nukleotida		
Purin	Adenin Guanin	Adenin Guanin
Pyrimidin	Sitosin Timin	Sitosin Urasil
Banyaknya	Dua	Satu

Organisasi nukleotida untuk membentuk DNA. Nukleotida-nukleotida berikatan sedemikian rupa sehingga asam fosfat dan deoksiribosa saling bergantian satu sama lain dalam dua utas yang terpisah, dan utas-utas tersebut dikat bersama-sama oleh pasangan basa komplementer, masing-masing. Rangkaian pasangan komplementer dari pasangan basa adalah sebagai berikut: CG, CG, GC, TA, CG, TA, GC, AT dan AT.

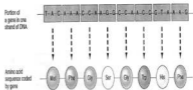


Gambar 5.4 Ikatan komplementer pasangan basa di dalam kromosom
(Disalin dari Fox Human Physiology, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2003, p. 43).

Molekul-molekul basa ini saling terikat satu sama-lain oleh ikatan Hidrogen yang sangat lemah. Karena lemahnya ikatan-ikatan ini, kedua utas dapat ditarik saling menjauhi dengan mudah, dan hal ini terjadi berkali-kali selama mereka berfungsi di dalam sel.

Kode genetik

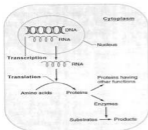
Untuk mengawasi pembentukan zat-zat lain dalam sel, dilakukan dengan cara kode genetik. Bila kedua utas molekul DNA saling berpisah, rangkaian basa purin dan pirimidin yang terpapar ini menonjol ke samping tiap-tiap utas. Penonjolan basa-basa ini membentuk kode. Apa yang disebut kata-kata kode terdiri atas triplet basa – yaitu masing-masing tiga basa yang berurutan merupakan kode. Rangkaian kata-kata kode mengawali rangkaian asam amino dalam molekul protein selama sintesis protein dalam sel. Setiap molekul DNA berutas dua membawa kode gennya masing-masing. Ketiga kata-kata kode ini bertanggung jawab untuk meletakkan tiga asam amino, prolin, serin dan asam glutamat dalam molekul protein. Selanjutnya, ketiga asam amino ini akan berbaris dalam molekul protein seperti barisan kode genetik dalam utas DNA.



Gambar 5.5 Asam amino yang sesuai dengan kode genetiknya

(Disalin dari Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2001, p. 93).

Sintesis protein melalui dua proses utama, yaitu: (1) proses transkripsi, pembentukan RNA di dalam nukleus, dan (2) proses translasi, pembentukan protein dalam ribosom.



Gambar 5.6 Rangkaian proses pengawasan gen untuk sintesis protein

(Disalin dari Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2001, p. 93).

Proses transkripsi.

Hampir semua DNA terletak di dalam inti sel, sedangkan sebagian besar fungsi sel berlangsung di dalam sitoplasma. Oleh karena itu, harus terdapat cara pada gen inti untuk mengawasi reaksi-reaksi kimia sitoplasma. Hal ini dilakukan oleh sel melalui perantara asam nukleat jenis lain, asam ribonukleat (RNA). Pembentukan RNA diawasi oleh DNA inti melalui proses transkripsi. RNA hasil transkripsi kemudian diangkut ke dalam ruang sitoplasma tempatnya bertugas untuk mengawasi sintesis protein.

Pembentukan RNA. Salah satu utas molekul DNA yang mengandung gen, bekerja sebagai template untuk mensintesis RNA. Utas yang lainnya tidak mempunyai fungsi pengawasan genetik, tetapi melakukan replikasi

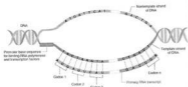
sendiri. Kata-kata kode dalam DNA untuk utas fungsional menyebabkan pembentukan kata-kata kode komplementer yang disebut kodon dalam RNA.

Bahan dasar pembentuk RNA hampir sama dengan bahan dasar pembentuk DNA, kecuali ada dua keadaan yang berbeda, yaitu: (1) gula deoksiribosa tidak digunakan dalam pembentukan RNA. Sebagai gantinya adalah gula ribosa yang sedikit berbeda susunannya dengan deoksiribosa; (2) basa timin diganti oleh basa urasil.

Pembentukan nukleotida RNA. Bahan dasar pembentuk RNA mula-mula membentuk nukleotida pensil sama seperti sintesis DNA. Empat nukleotida yang tidak sama digunakan dalam pembentukan RNA. Masing-masing nukleotida mengandung basa adenin, guanin, sitosin, dan urasil. Urasil menggantikan timin dalam empat nukleotida yang membentuk RNA.

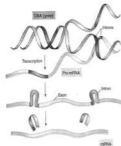
Pengaktifan nukleotida. Terjadi ketika terjadi penambahan flap-top nukleotida dua rantai fosfat untuk membentuk trifosfat. Dua fosfat terakhir ini bergabung ke nukleotida dengan ikatan fosfat berenergi tinggi yang diperoleh dari ATP. Hasilnya adalah terbentuknya energi tinggi dalam jumlah besar pada setiap nukleotida, dan energi digunakan untuk meningkatkan reaksi-reaksi kimia yang mengakhiri pembentukan RNA.

Proses transkripsi. Proses ini diawali oleh pemisahan kedua utas molekul DNA. Selanjutnya, salah satu utas digunakan sebagai template tempat dibentuknya RNA. Di bawah pengaruh enzim polimerase RNA terjadi pembentukan molekul RNA, sebagai berikut: (1) pengikatan semestara basa RNA dengan setiap basa DNA, (2) pengikatan basa-basa RNA satu sama lain, (3) pemecahan utas RNA dari utas DNA. Setelah molekul RNA terbentuk, molekul RNA bendifusi ke luar dari inti ke semua bagian sitoplasma untuk mengawasi sintesis protein.



Gambar 5.7 Proses transkripsi – pembentukan primary RNA dari DNA

[Disalin dari Vander Hammen Physiology: The Mechanism of Body Function, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2001, p. 94].



Gambar 5.8 Proses pre-mRNA ke mRNA

[Disalin dari Fox Human Physiology, (8th edn), McGraw-Hill Co., 2003, p. 66].

Ada tiga jenis RNA yang penting pada sintesis protein adalah: (1) messenger RNA, (2) transfer RNA, dan (3) ribosomal RNA.

Messenger RNA (mRNA). Merupakan utas kurus panjang yang tersuspensi dalam sitoplasma. Molekul ini biasanya terdiri dari beberapa ratus sampai beberapa ribu nukleotida dalam utas yang berpasangan, dan mengandung kodon yang sebenarnya merupakan komplementer kata-kata kode dari gen. Kodon-kodon RNA untuk 20 jenis asam amino penting yang umumnya terdapat dalam molekul protein (tabel 5.2). Beberapa kodon menggambarkan isyarat "mulai membentuk molekul protein" atau "menghentikan pembentukan molekul protein". Beberapa asam amino dinyatakan oleh lebih satu kode.

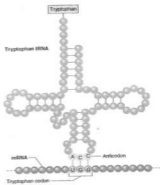
Tabel 5.2 Berbagai triplet DNA dan kodon RNA untuk asam amino masing-masing

Asam Amino	Kodon RNA
Alanin	GCU GCC GCA GCG
Arginin	CGU CGC CCA CCG AGA AGG
Asam Aspartat	GAU GAG
Glutamat	GAA GAG
Asparagin	AAU AAC
Fenilalanin	UUU UUC
Glin	GGU GGC GGA GGG
Glutamin	CAA CAG
Histidin	CAU CAC
Isoleusin	AUU AUC AUA
Leusin	CUU CUC CUA CUG UUA UUG
Lisin	AAA AAG
Metionin	AUG
Prolin	CCU CCC CCA CCG
Serin	UCU UCC UCA UCG

Asam Amino	Kodon RNA
Sistein	UGU UGC
Tirosin	UAU UAC
Treonin	ACU ACC ACA ACG
Triptofan	UGG
Valin	GUU GUC GUA GUG
Mulai (C)	AUG GUG
Berhenti (CT)	UAA UAG UGA

[Disalin dari Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia, p. 32].

Transfer RNA (tRNA). RNA yang bertugas mentransfer molekul asam amino ke molekul protein saat protein disintesis. Setiap molekul tRNA biasanya hanya bergabung dengan satu jenis asam amino dari 20 asam amino yang terdapat dalam protein. tRNA kemudian bekerja sebagai pembawa (carrier) untuk transpor setiap jenis asam amino spesifik ke ribosom tempat dibentuknya molekul protein. tRNA hanya mengandung sekitar 80 nukleotida. Merupakan molekul yang relatif kecil bila dibandingkan dengan mRNA. tRNA adalah suatu rantai nukleotida yang berlipat dengan bentuk seperti daun semanggi, dimana pada salah satu ujung molekul selalu merupakan asam adenilat, yang terikat pada asam amino. Gugus prostetik pada tRNA memungkinkan RNA mengenali kodon spesifik disebut sebagai antikodon, dan antikodon ini terletak dekat pertengahan molekul tRNA. Selama pembentukan molekul protein, basa antikodon berikatan lemah dengan ikatan hidrogen dengan basa kodon mRNA. Dengan cara ini masing-masing asam amino berbaris satu demi satu sepanjang rantai mRNA. Dengan kata lain, memastikan rangkaian asam amino yang sesuai dalam molekul protein.



Gambar 5.8 tRNA pada proses translasi – kodon dan anti kodon

[Disalin dari Vander Naman *Physiology: The Mechanism of Body Function*, (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001, p. 96].

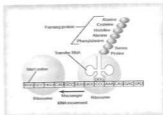
Ribosoma/ rRNA (rRNA). RNA jenis ketiga di dalam sitoplasma. Membentuk sekitar 60% ribosom. Sisa ribosom lainnya adalah protein. Mengandung 50 protein yang tidak sama yaitu: protein struktural, dan enzim-enzim yang dibutuhkan pada pembentukan molekul protein. Fungsi rRNA selalu dikaitkan dengan kedua jenis RNA lainnya.

Pembentukan ribosom dalam anak inti. Semua molekul DNA yang digunakan untuk pembentukan rRNA yang terletak pada satu pasang kromosom inti. Akan tetapi, pasangan kromosom ini mengandung banyak

ribun gen ribosom ini karena banyak rRNA yang dibutuhkan untuk fungsi sel. Ketika rRNA dibentuk, dikumpulkan pada anak inti, suatu struktur khusus yang terletak dekat kromosom. rRNA secara khusus diproses dalam anak inti dan berikatan dengan protein ribosom untuk membentuk hasil kondensasi granular yang merupakan bentuk primordial ribosom. Ribosom kemudian dikeluarkan dari nukleolus (anak inti) melalui pori membran yang besar, bermigrasi ke hampir semua bagian sitoplasma, kemudian sebagian besar ribosom terikat pada permukaan luar retikulum endoplasma.

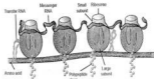
Proses translasi

Ketika molekul mRNA bersentuhan dengan ribosom, ia berjalan lewat ribosom, mulai pada ujung "predetermined" yang ditentukan oleh rangkaian basa RNA yang tepat. Tetapi molekul protein tidak segera dibentuk. Protein baru mulai dibentuk bila sudah sampai pada kodon "awal" (atau pemula rantai) memasuki ribosom. Selanjutnya terbentuklah molekul protein seiring berjalannya mRNA dalam ribosom. Proses ini disebut proses translasi. Ribosom membaca kode mRNA sebagaimana halnya pita tape recorder sewaktu melewati playback head dari suatu tape recorder. Bila kodon "berhenti" (atau "pengakhiran rantai") masuk melalui ribosom, akhir molekul protein memberi isyarat dan seluruh molekul protein dibebaskan ke dalam sitoplasma. Tidak ada ribosom spesifik bagi jenis protein tertentu. Ribosom merupakan struktur sederhana di dalam mana reaksi kimia terjadi.



Gambar 5.9 Proses translasi – sintesis protein di ribosom

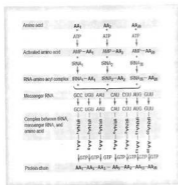
(Disalin dari Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia, p. 32).



Gambar 5.10 Sintesis protein - transfer RNA dan messenger RNA di ribosom

(Disalin dari Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia, p. 34).

Ikatan peptida. Urutan asam-asam amino dalam rantai protein yang baru dibentuk berikatan satu sama lain menurut jenis reaksi sebagai berikut: Pada reaksi kimia ini, rantai hidroksil dipindahkan dari bagian COOH salah satu asam amino sedangkan hidrogen dari bagian NH₂ asam amino lainnya dibuang. Rantai hidroksil dan hidrogen bergabung membentuk air, dan dua tempat reaktif yang tertinggal pada urutan asam amino bersatu membentuk satu molekul. Proses ini disebut ikatan peptida.



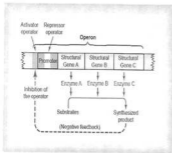
Gambar 5.11 Proses sintesis molekul protein – membutuhkan energi
(Disalin dari Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia, p. 34).

Sintesis zat-zat lain dalam sel. Proses pembentukan molekul protein menghasilkan beribu-ribu protein enzim yang pada hakikatnya akan mengawasi semua reaksi kimia lain yang berlangsung dalam sel. Enzim-enzim ini akan meningkatkan sintesis lipid, glikogen, purin, pirimidin, dan beratus-ratus zat lainnya.

Pengawasan fungsi genetik dan aktivitas biokimia sel

Pada dasarnya terdapat 2 cara pengawasan aktivitas biokimia sel yang berbeda, yaitu: (1) pengaturan genetik, tempat aktivitas gen-gen itu diawasi, (2) pengaturan enzimatik, tempat kecepatan aktivitas enzim diawasi.

Pengaturan genetik. Fungsi gen diawasi dalam berbagai jalan. Beberapa gen dalam keadaan normal tidak aktif, tetapi diaktifkan oleh zat inducer. Gen lain secara alamiah aktif, tetapi dapat dihambat oleh zat represor. Sintesis hasil-hasil biokimia sel biasanya memerlukan serangkaian reaksi, dan masing-masing reaksi dikatalisir oleh enzim tertentu. Pembentukan semua enzim yang diperlukan untuk proses sintesis, yang diatur oleh serangkaian gen yang semuanya terletak pada utas DNA kromosom yang sama. Daerah utas ini disebut operon dan gen yang bertanggung jawab untuk pembentukan masing-masing disebut gen struktural. Kecepatan operon berfungsi untuk transkripsi RNA, dan karena itu menggerakkan sistem enzimatik untuk proses biokimia. Ditentukan oleh adanya segmen kecil pada utas DNA yang masing-masing disebut promoter dan operator. Masing-masing segmen ini merupakan urutan nukleotida DNA spesifik, tetapi mereka sendiri tidak berperan sebagai template untuk pembentukan RNA. Mereka semata-mata berfungsi sebagai unit pengatur operon.



Gambar 5.12 Pengawasan sintesis protein - Operon dan umpan balik negatif

(Disalin dari Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia, p. 35).

Mula-mula promotor berikatan dengan RNA polimerase yang merupakan enzim yang bergerak sepanjang operon, untuk menyebabkan transkripsi messenger RNA yang sesuai. Akan tetapi, operator terletak antara promotor dan gen struktural sehingga operator merupakan pintu gerbang pengatur yang dapat terbuka atau tertutup. Bila pintu gerbang terbuka, RNA polimerase akan bergerak sepanjang operon, dan menyebabkan proses transkripsi; tetapi bila pintu gerbang tertutup, RNA polimerase tertahan pada tingkat promotor dan operon tetap tidak aktif. Terbuka tertutupnya pintu gerbang diatur secara umpan balik negatif. Adanya

hasil sintesis di dalam tubuh dalam jumlah kritis di sitoplasma sel akan menyebabkan umpan balik negatif pada operator untuk menghambatnya, yaitu dengan menutup pintu gerbang. Sebaliknya, bila hasil yang disintesis mengalami penurunan dalam sel dan konsentrasinya turun, pintu gerbang operator terbuka dan sekali lagi operator menjadi aktif. Dengan cara ini, konsentrasi hasil sintesis diatur secara otomatis. Cara lain, antara lain: (1) adanya zat induser dari luar sel kadang-kadang mengaktifkan operator, (2) adanya suatu gen regulator yang terdapat ditempat lain dalam inti sel kadang-kadang mengatur operator, (3) adanya inhibitor atau induser kadang-kadang mengatur banyak operator pada saat yang sama, (4) beberapa proses sintetik tidak diatur pada tingkat DNA tetapi pada tingkat RNA untuk mengatur proses translasi pembentukan protein oleh messenger RNA.

Pengawasan aktivitas enzim. Dengan cara yang sama, inhibitor dan aktivator dapat mempengaruhi sistem pengaturan genetik, demikian juga enzim-enzim sendiri dapat diawasi secara langsung oleh inhibitor atau aktivator lain. Hal ini menggambarkan mekanisme kedua tempat fungsi biokimia sel dapat diawasi.

Penghambatan enzim. Sangat banyak zat kimia yang dibentuk di dalam sel mempunyai umpan balik langsung pada sistem enzim yang mensintesis enzim-enzim tersebut. Hampir selalu produk yang disintesis bekerja pada enzim pertama dalam rangkaian, bukan pada enzim berikutnya. Dengan mudah dapat diketahui pentingnya penghambatan enzim pertama ini untuk mencegah pembentukan produk antara yang tidak digunakan. Proses penghambatan enzim ini adalah contoh lain pengawasan umpan balik negatif, proses ini bertanggung jawab pada pengawasan konsentrasi beberapa asam amino intrasel yang tidak diawasi oleh mekanisme genetik seperti konsentrasi purin, pirimidin, vitamin dan zat-zat lain.

Pengaktifan enzim. Enzim-enzim yang berada dalam keadaan normal tidak aktif atau telah dinonaktifkan oleh beberapa zat inhibitor, sering dapat diaktifkan. Contoh dalam hal ini adalah kerja siklik adenosin

monofosfat (uAMP) yang menyebabkan pemecahan glikogen sehingga energi yang berasal dari molekul glukosa yang dilepaskan dapat digunakan untuk membentuk ATP berenergi tinggi. Ketika sebagian besar ATP didalam sel berkurang, sejumlah besar AMP mulai dibentuk sebagai hasil pemecahan ATP. Adanya siklus AMP menunjukkan bahwa cadangan ATP rendah. Siklus AMP segera mengaktifkan fosforilase yang memecahkan glikogen, melepaskan molekul glukosa yang segera digunakan untuk fosforilasi menghasilkan energi yang merestitusi ATP kembali. Dalam hal ini siklus AMP bekerja sebagai aktivator enzim dan karena itu membantu mengawasi konsentrasi ATP intrasel.

Pertumbuhan dan pembelahan sel

Jumlah sel dalam tubuh manusia diatur oleh pembelahan sel dan kematian sel. Semua sel manusia, kecuali sperma dan ovum, membelah untuk memperbanyak jumlahnya melalui proses mitosis, misalnya pada masa pertumbuhan, untuk memperbaiki kerusakan jaringan kulit, untuk menggantikan sel-sel yang tua atau mati. Kematian sel menurunkan jumlah sel dan ini terjadi melalui proses apoptosis atau nekrosis. Apoptosis menghilangkan sel yang tidak diinginkan sepanjang masa kehidupan dan proses ini penting terutama dalam perkembangan janin. Nekrosis adalah destruksi sel rusak yang disertai dengan proses inflamasi, misalnya pada ganggren.

Pembelahan (reproduksi) sel

Pembelahan sel merupakan contoh lain bagi peranan yang terdapat dimana-mana, bahwa sistem genetik DNA memegang semua proses kehidupan. Terdapat mekanisme pengaturan gen dan pengaturan internal yang menentukan sifat pertumbuhan sel dan juga kapan atau apakah sel-sel ini akan membelah untuk membentuk sel-sel baru. Dengan cara ini, semua sistem genetik yang penting ini mengatur setiap stadium perkembangan manusia dari satu sel ovum yang dibuahi sampai seluruh tubuh berfungsi. Dengan kata lain, tema pokok untuk hidup adalah sistem genetik DNA.

Pada hampir semua peristiwa dalam sel, pembelahan sel juga mulai pada inti itu sendiri. Langkah pertama adalah replikasi (duplikasi), mitosis semua DNA dalam kromosom. Langkah kedua adalah pembelahan dua pasang DNA antara dua inti yang membelah, lalu kemudian pembelahan sel itu sendiri untuk membentuk dua anak sel baru.

Siklus kehidupan lengkap sel yang tidak dihambat berlangsung sekitar 10 sampai 20 jam dari pembelahan ke pembelahan, dan periode mitosis berakhir kira-kira satu setengah jam. Akan tetapi, dalam tubuh hampir selalu terdapat pengawasaan/penghambatan yang memperlambat atau menghentikan siklus hidup sel yang tidak dihambat dan mengakibatkan periode siklus hidup sel bervariasi dari 10 jam (bagi sel-sel sumsum tulang yang terangsang) sampai seumur hidup (bagi sel-sel saraf dan otot rangka).

Replikasi DNA. DNA mulai dibentuk sekitar 5 jam sebelum berlangsung proses pembelahan mitosis dimulai, membentuk dua tiruan dari semua DNA. Masing-masing menjadi DNA pada dua anak sel yang baru melalui proses mitosis. DNA mengalami duplikasi dengan jalan yang hampir sama dengan proses dimana RNA dibentuk dari DNA. Satu-satunya perbedaannya antara susunan utas DNA yang baru dengan pembentukan utas RNA adalah utas DNA yang baru tetap terikat pada utas DNA yang lama yang membentuknya, sehingga dua utas heliks DNA berutas ganda baru.



Gambar 5.13 Replikasi DNA – menghasilkan dua DNA yang baru
(Diadaptasi dari Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function, 9th edn, McGraw-Hill Co., 2001, p. 106).

Kromosom dan replikasinya. Kromosom terdiri dari dua bagian utama yaitu: DNA dan protein. Protein, selanjutnya terutama disusun dari molekul-molekul kecil. Banyak diantaranya adalah histon yang mungkin berperan untuk melipat atau memadatkan utas DNA menjadi ukuran yang dapat diatur. Sebaliknya, protein kromosom non-histon, merupakan unsur utama sistem pengaturan genetik yang bekerja sebagai aktivator,

inhibitor dan enzim. Semua DNA dari kromosom tertentu tersusun dalam satu heliks ganda yang panjang dan gen melekat satu sama lain dengan cara end-on-end. Pada manusia, molekul seperti ini mempunyai berat molekul sekitar 60 milyar, bila diurutkan panjangnya kira-kira 7,5 cm atau beberapa ribu kali panjang garis tengah inti itu sendiri. Heliks panjang ini melipat atau melilit menyerupai per dan posisinya dipertahankan seperti ini dengan ikatannya pada molekul histon.

Replikasi kromosom terjadi akibat alami dari replikasi DNA. Bila heliks ganda yang baru memisahkan diri dari heliks ganda yang asli, diduga ia membawa beberapa protein yang lama menyertainya, atau berikatan dengan protein yang baru. DNA bekerja sebagai tulang punggung kromosom yang baru mengalami replikasi.

Setiap sel manusia mengandung 46 kromosom yang tersusun dalam 23 pasang. Pada umumnya, gen-gen pada kedua kromosom dari setiap pasang hampir identik satu sama lain, sehingga biasanya dinamakan bahwa gen-gen yang tidak sama timbul berpasangan, walaupun kadang-kadang tidak demikian halnya.

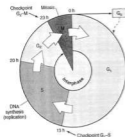
Siklus sel. Pertumbuhan dan pembelahan sel merupakan serangkaian kejadian teratur yang disebut juga siklus sel (Gambar 5.14). Durasi setiap tahap dari siklus sel ini bervariasi tergantung jenis sel. Sebagian besar waktu sebelum pembelahan sel berada dalam tahap interfase, yaitu periode pertumbuhan sebelum replikasi DNA. Sel saraf yang matur akan berada dalam interfase secara permanen karena saraf tidak membelah. Mitosis atau fase pembelahan merupakan sebagian kecil dari keseluruhan siklus dan terjadi pada sepersepuluh sel-sel kita setiap harinya. Waktu siklus rata-rata untuk beberapa sel ditunjukkan pada tabel 5.3.

Tabel 5.3 Durasi siklus sel pada sel terspesialisasi

Jenis Sel	Siklus sel
Susunan tulang	10 – 18 jam
Telur dan sperma	2 – 3 jam
Neutrofil	13 hari
Eritrosit	120 hari
Neuron pada susunan saraf pusat	Seumur hidup

Terdapat tiga tahap pada interfase:

1. Pertumbuhan primer (G₁) saat sintesis komponen sitoplasma
2. Sintesis (S) saat replikasi DNA
3. Fase pertumbuhan kedua yang lebih singkat (G₂), saat protein diperlukan.



Gambar 5.14 Siklus sel

[Diadaptasi dari Vander Mearns Physiology: The Mechanism of Body Function, 10th edn. McGraw-Hill Co., 2001, p. 105].

Mitosis. Proses pembelahan sel menjadi dua sel yang baru disebut mitosis. Bila sel telah mengalami duplikasi dan setiap kromosom telah membelah menjadi dua kromosom baru, masing-masing kromosom sekarang disebut kromatid, mitosis mengikutinya secara otomatis hampir tanpa kegagalan dalam beberapa jam.

Peristiwa pertama mitosis berlangsung dalam sitoplasma, pada atau sekeliling struktur kecil yang disebut sentriol. Ada dua sentriol yang berdekatan satu sama lain, yang terletak dekat salah satu kutub inti. Setiap sentriol merupakan badan silindris kecil yang panjangnya sekitar 0,4 mikron dan garis tengahnya sekitar 0,15 mikron. Terdiri dari sembilan struktur paralel yang menyerupai tubulus sekitar bagian dalam dinding selinder.

Pada permulaan mitosis kedua pasang sentriol mulai menjauhi satu sama lain. Ini disebabkan oleh karena protein mikrotubulus yang tumbuh diantara masing-masing pasang dan benar-benar mendorong mereka saling menjauh. Pada saat yang sama, mikrotubulus tumbuh secara radial menjauhi tiap-tiap pasangan, yang membentuk bintang berbulu yang disebut aster pada tiap ujung sel. Sebagian dari ini mengadakan penetrasi ke inti dan berperan memisahkan kedua pasang sentriol yang disebut spindle. Seluruh kumpulan mikrotubulus ditambah dua pasang sentriol disebut aparatus mitosis.

Profase. Tingkat pertama dari mitosis. Spindel sedang terbentuk, zat-zat kromatin inti (DNA), yang berada dalam fase interfase terdiri dari utas-utas panjang yang tergulung longgar, memendek menjadi kromosom yang berbatas tegas dan penggulangan DNA semakin erat. Atau dengan kata lain, kromosom yang berreplikasi saat interfase berkondensasi menjadi dua kromatid yang bergabung pada sentromer.

Prometofase. Selama tingkat ini, selubung inti melarut, dan mikrotubulus dari aparatus mitosis yang terbentuk, melekat pada kromosom.

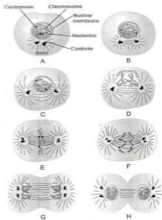
Metafase. Selama metafase pasangan sentriol terdorong saling menjauh oleh pertumbuhan spindle, dan karena itu kromosom tertarik dengan

kuat oleh perlekatan mikrotubulus ke pusat sel. Kromosom menempel pada sepindel disentromerinya dan berbaris pada bidang ekuator (tengah) sel.

Anafase. Dengan masih bertumbuhnya spindle. Setiap pasang kromosom saling berpisah, karena kromosom-kromosomnya tertarik pada sentromerinya. Satu set kromosom akan bergerak ke masing-masing sel baru. Pergerakan terjadi karena pemendekan dan pemanjangan mikrotubulus yang membentuk spindle.

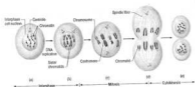
Telofase. Pada fase telofase, spindle mitosis terus tumbuh lebih panjang, menarik dua kumpulan kromosom anak untuk terpisah sama sekali. Selanjutnya, apparatus mitosis melarut dan terbentuk membran inti baru di sekitar tiap-tiap kumpulan kromosom. Kemungkinan membran inti ini dibentuk dari bagian-bagian retikulum endoplasma yang telah tersedia dalam sitoplasma. Setelah itu, sel membuat penyempitan pada dua garis tengahnya antara kedua inti. Ini disebabkan karena cincin kontraksi mikrofilamen yang terdiri dari aktin dan mungkin juga miosin (filamen kontraktile otot) terjadi pada sambungan sel yang baru dibentuk sehingga menyempit dan semakin menyempit dan akhirnya melepaskan satu dengan yang lainnya.

Akhirnya akan terbentuk dua sel terpisah (sitokinesis). Kedua sel tersebut adalah sama; setiap sel memiliki nucleus dengan satu set kromosom yang sama dengan sel induk dan satu set yang baru disintesis saat siklus sel.



Gambar 5.15 Tahapan Mitosis. A, B dan C (profase); D (prometafase); E (metaphase); F (anafase); G dan H (telofase).

(Divaldi dan Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia. p. 37).



Gambar 5.16 Siklus sel.

(Dianalisis dari Vander Hamon *Physiology: The Mechanism of Body Function*, (8^e edisi). McGraw-Hill Co., 2001, p. 100).

Meiosis. Merupakan bentuk khusus pembelahan sel dimana jumlah kromosom induk akan berkurang setengahnya [Gambar 5.16].

Pada meiosis I atau pembelahan reduksi, satu dari setiap pasang kromosom (23 pasang, 46 kromosom) terpisah menjadi dua sel. Tahap pembelahan meiosis adalah sebagai berikut:

Interfase. Sel yang membelah akan mereplikasi DNA setiap kromosomnya sehingga terbentuk dua kromatid yang bergabung pada sentromer, seperti pada mitosis (pasangan homolog).

Profase I. DNA akan berkondensasi, seperti pada mitosis, dan kromosom (dengan empat kromatid) menjadi lebih jelas terlihat. Kromosom akan berbaris gen per gen dan dikat menyatu oleh campuran RNA dan protein. Kromatid dari setiap selinduk akan berpisah pada titik yang sama, bertukar sedikit dan menutup lagi-proses ini disebut pindah silang (*crossing over*). Ini merupakan pencampuran gen dari setiap kromosom induk. Jumlah gen tetap sama, tetapi memiliki kombinasi gen yang berbeda.

Metafase I. Kromosom berbaris pada spindle.

Anafase I. Setiap kromosom yang homolog akan terpisah dan bergerak ke ujung-ujung spindle yang berlawanan.

Telofase I. Pembelahan sel untuk membentuk dua sel haploid (n) dengan satu kromosom terduplikasi pada masing-masing sel.

Pada tahap kedua pembelahan meiosis, meiosis II, protein disintesis tetapi DNA tetapi DNA tidak bereplikasi. Tahap pembelahan meiosis II adalah sebagai berikut:

Profase II. Kromosom menjadi jelas terlihat.

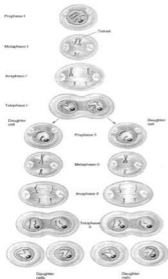
Metafase II. Spindel akan mengatur barisan kromosom.

Anafase II. Sentromer berpisah dan setiap pasang kromatid menjadi dua kromosom yang masing-masing tertarik ke ujung-ujung sel yang berlawanan.

Telofase II. Set kromosom yang terpisah akan disekubungi oleh membrane inti. Kemudian terjadi pembelahan sel menjadi dua. Akan terbentuk empat sel dengan jumlah kromosom setengah dari kromosom induk.

Tabel 5.4 Perbedaan antara mitosis dan meiosis

Sifat	Mitosis	Meiosis
Jumlah pembelahan inti	Satu	Dua
Jumlah total akhir pembelahan	Dua	Empat
Jumlah kromosom (n)	$2n$, sama sel induk (46)	$1n$, 1/2 jumlah sel induk (23)
Jenis sel	Sel tubuh (somatik)	Sel germinal di testis/ ovarium
Kejadian pada manusia	Seumur hidup	Setelah pubertasi
Fungsi	Pemeliharaan/ perbaikan sel, pertumbuhan.	Produksi sperma atau ovum



Gambar 5.16 Meiosis

[Disalin dari Fox Hames Physiology (3rd edn), McGraw-Hill Co., 2003, p. 77]

Pengawasan pertumbuhan dan pembelahan sel

Pertumbuhan dan pembelahan sel biasanya terjadi bersama-sama. Pertumbuhan dalam keadaan normal mengakibatkan replikasi DNA ini, dan beberapa jam kemudian diikuti mitosis. Kita tahu bahwa sel-sel tertentu tumbuh dan berkembang biak terus menerus, seperti sel-sel yang membentuk darah pada sumsum tulang, lapisan *germinathium* kulit, dan epitel usus. Akan tetapi, banyak sel-sel lain seperti beberapa sel otot, tidak berbiak selama bertahun-tahun. Beberapa sel seperti neuron dan sel otot rangka tidak berkembang biak selama hidup. Bila terdapat insufisiensi beberapa jenis sel dalam tubuh, sel-sel ini akan tumbuh dan berkembang biak dengan amat cepat sampai jumlah yang sesuai tersedia lagi. Misalnya tujuh perdelapan (7/8) jaringan hati dapat dibuang secara pembedahan, dan sel-sel sisanya yang berjumlah seperdelapan (1/8), akan tumbuh dan membelah sampai massa hati kembali normal atau hampir normal. Efek yang sama terjadi pada hampir setiap sel jaringan kecuali sel yang sangat berdiferensiasi, misalnya sel saraf dan sel otot.

Amat sedikit yang diketahui tentang mekanisme yang mempertahankan jumlah yang tetap berbagai jenis sel dalam tubuh. Tetapi penelitian percobaan menggambarkan bahwa zat-zat pengawas yang disebut *cholein* disekresi berbagai sel yang menyebabkan efek umpan balik untuk menghentikan atau memperlambat pertumbuhannya bila terlalu banyak sel yang dibentuk. Kita tahu bahwa berbagai jenis sel yang dikeluarkan dari tubuh dan ditanam dalam biakan jaringan dapat tumbuh dan berkembang biak dengan cepat tanpa batas bila medium tempat ia tumbuh secara teratur diperbaharui. Mereka akan berhenti tumbuh bila sejumlah kecil sekresinya sendiri dibarkan terkumpul dalam medium ini, yang menyokong pendapat bahwa zat pengawas membatasi pertumbuhan sel.

Kanker

Kanker merupakan suatu penyakit yang menyerang proses dasar kehidupan sel, yang hampir semuanya mengubah genom sel (komponen genetik total sel) serta mengakibatkan pertumbuhan liar dan penyebaran sel kanker. Penyebab perubahan genom ini adalah mutasi salah satu gen atau lebih, atau mutasi sebagian besar segmen utas DNA yang mengandung banyak gen; atau pada beberapa keadaan, penambahan atau pengurangan sebagian besar segmen kromosom. Beberapa faktor yang kemungkinan menambah mutasi adalah: (1) radiasi ionisasi, (2) zat kimia tertentu yang dikenal sebagai karsinogen, (3) beberapa virus, (4) iritasi fisik, dan (5) predisposisi herediter.

Perbedaan utama antara sel kanker dengan sel normal adalah: (1) sel kanker tidak mematuhi batas-batas pertumbuhan sel yang umum. Diduga karena ia tidak mensekresi cholone (zat yang memperlambat atau menghentikan pertumbuhan sel normal yang berlebihan) yang sesuai; (2) sel kanker jauh kurang adhesif satu sama lain dibandingkan sel normal, oleh karena itu mereka cenderung mengembara melalui jaringan, memasuki aliran darah, dan di transport ke seluruh tubuh tempat mereka membentuk banyak nodus untuk pertumbuhan kanker baru.

Sel kanker dapat membunuh karena jaringan kanker bersaing dengan jaringan normal dalam memperoleh nutrisi. Karena sel kanker terus menerus melakukan proliferasi, maka jumlahnya semakin lama semakin banyak mendesak sel normal, sehingga sel normal lambat laun mengalami kematian karena kekurangan nutrisi.

Sel Punca (*stem cell*) dan harapan medis

Dari uraian struktur sel, organel dan fungsinya serta pengawasan genetik pertumbuhan dan perkembangan sel maupun sintesis bahan-bahan untuk membangun perangkat sel dan fungsinya, dapat disimpulkan

bahwa sel tubuh manusia suatu ciptaan yang luar biasa untuk menunjang kehidupannya dengan baik. Akan tetapi, sesekali suatu bagian tubuh mengalami gangguan atau cedera yang tidak lagi dapat diperbaiki, terutama pada jaringan saraf dan otot. Milyaran dolar telah dikeluarkan untuk mengobati pasien yang organnya lenyap, atau rusak permanen tanpa hasil yang memuaskan atau sia-sia. Idealnya, ketika tubuh mengalami kerusakan yang tidak dapat diperbaiki, tersedia bagian-bagian pengganti baru dan permanen yang dapat memulihkan fungsi dan penampilan ke normal. Saat ini sedang berkembang dengan cepat dari ranah fiksi ilmiah menuju kemajuan ilmiah, yaitu ilmu tentang sel punca (*stem cell*). Ada dua kategori sel punca saat ini sedang dieksplorasi untuk potensinya dalam menyembuhkan berbagai penyakit yang berkaitan dengan kegagalan jaringan atau organ; yaitu (1) sel punca mudigah (*embryonic stem cell*); (2) sel punca spesifik jaringan (*tissue specific stem cell*) yang dipanen dari orang dewasa.

Sel punca mudigah. Adalah sel induk yang terbentuk dari pembelahan-pembelahan sel telur yang dibuahi. Sel-sel yang belum berdiferensiasi ini akhirnya, sementara pada saat yang sama memperbaharui diri mereka sendiri. Sel punca mudigah bersifat totipoten (memiliki potensial total), karena sel ini memiliki potensi untuk menghasilkan semua tipe sel di tubuh jika diberi rangsangan yang sesuai. Saat ia membelah diri selama perkembangannya, sel-sel punca ini memisah mengikuti berbagai jalur spesialisasi di bawah arahan sinyal-sinyal kimiawi yang dikontrol secara genetik. Sel punca mudigah yang belum berdiferensiasi menghasilkan banyak sel punca spesifik jaringan yang baru berdiferensiasi parsial untuk masing-masing jaringan. Sebagai contoh, sel punca spesifik jaringan otot akan berdiferensiasi menjadi sel otot.

Sel punca spesifik jaringan. Sebagian sel punca spesifik jaringan tetap ada di jaringan dewasa dan berfungsi sebagai sumber tetap sel-sel baru di

jaringan atau organ tersebut. Sebagai contoh, di sumsum tulang terdapat berbagai sel punca yang berdiferensiasi parsial yang menghasilkan berbagai jenis sel-sel darah, yang setelah berdiferensiasi sempurna akan dibebaskan ke dalam darah sesuai dengan kebutuhan. Saat ini telah ditemukan sel punca spesifik jaringan otot dan otak dewasa. Meskipun sel saraf dan sel otot matang tidak dapat berproduksi sendiri, namun para peneliti baru-baru ini, menemukan bahwa sampai tahap tertentu otak dan otot dewasa dapat menghasilkan sel-sel baru sepanjang hidup melalui sel-sol punca yang tetap ada ini. Akan tetapi, di jaringansaraf dan otot proses ini terlalu lambat untuk mengimbangi kerusakan yang luas, seperti pada stroke atau serangan jantung. Beberapa peneliti sedang mencari obat yang dapat merangsang sel punca spesifik jaringan pasien sendiri agar dapat mengganti jaringan yang rusak atau hilang – suatu upaya yang hingga saat ini belum berhasil.

Harapan medis. Harapan medis yang lebih besar diberikan oleh sel-sel punca yang ditumbuhkan di luar tubuh. Pada tahun 1998, untuk pertamakalinya para peneliti berhasil mengisolasi sel punca mudigah dan mempertahankannya tanpa batas dalam keadaan tidak berdiferensiasi dalam biakan. Banyak ilmuwan percaya bahwa riset yang melibatkan sel punca mudigah yang dibiak akan menghasilkan terobosan terapi bagi beragam penyakit. Janji medis sel punca mudigah terletak pada potensi sel ini untuk berfungsi sebagai bahan serbaguna yang dapat diarahkan menjadi tipe sel apapun yang dibutuhkan untuk memperbaiki kerusakan tubuh. Ilmuwan secara bertahap mempelajari ramanu sinyal kimiawi yang tepat untuk mengarahkan sel yang belum berdiferensiasi menjadi sel yang diinginkan. Mereka meramalkan bahwa mereka mampu menumbuhkan jaringan yang mereka inginkan dan akhirnya menghasilkan organ utuh sesuai pesanan, misalnya hati, jantung dan ginjal.

Ringkasan

1. Senyawa kimia dasar yang terlihat dalam pembentukan DNA, meliputi: (1) asam fosfat, (2) gula yang disebut deoksiribosa, (3) empat basa nitrogen, adenin (A), guanin (G), timin (T) dan sitosin (S). Asam fosfat dan deoksiribosa membentuk dua utas heliks DNA, serta basa terletak di antara utas dan menghubungkannya.
2. Komposisi DNA berbeda dengan komposisi RNA, pada gula nukleotida dan basa nukleotida. Gula nukleotida DNA adalah deoksiribosa, sedangkan RNA adalah ribosa. Basa purin; adenin dan guanin sama, tetapi berbeda pada basa pirimidin timin pada DNA, urasil pada RNA. DNA dan RNA mempunyai basa pirimidin yang sama pada sitosin.
3. Untuk mengawasi pembentukan zat-zat lain dalam sel, dilakukan dengan cara kode genetik. Kata-kata kode terdiri atas triplet basa – yaitu masing-masing tiga basa yang berurutan merupakan kode. Rangkaian kata-kata kode mengawali rangkaian asam amino dalam molekul protein selama sintesis protein dalam sel. Setiap molekul DNA berutas dua membawa kode gennya masing-masing. Ketiga kata-kata kode ini bertanggung jawab untuk meletakkan asam amino yang sesuai dengan kode masing-masing.
4. Sintesis protein melalui dua proses utama, yaitu: (1) proses transkripsi, pembentukan RNA di dalam nukleus, dan (2) proses translasi, pembentukan protein dalam ribosom.
5. Pada dasarnya terdapat 2 cara pengawasan aktivitas biokimia sel yang berbeda, yaitu: (1) pengaturan genetik, tempat aktivitas gen-gen itu diawasi, (2) pengaturan enzimatik, tempat kecepatan aktivitas enzim diawasi.
6. Pengaturan genetik diawasi dalam berbagai jalan. Beberapa gen dalam keadaan normal tidak aktif, tetapi diaktifkan oleh zat inducer. Gen lain secara alamiah aktif, tetapi dapat dihambat oleh zat represor.

7. Pembentukan semua enzim yang diperlukan untuk proses sintesis diatur oleh serangkaian gen yang semuanya terletak pada utas DNA kromosom yang sama. Daerah utas ini disebut operon dan gen yang bertanggung jawab untuk pembentukan masing-masing disebut gen struktural.
8. Kecepatan operon berfungsi untuk transkripsi RNA, dan karena itu menggerakkan sistem enzimatis untuk proses biokimiawi. Ditentukan oleh adanya segmen kecil pada utas DNA yang masing-masing disebut promoter dan operator. Masing-masing segmen ini merupakan urutan nukleotida DNA spesifik, tetapi mereka sendiri tidak berperan sebagai template untuk pembentukan RNA. Mereka semata-mata berfungsi sebagai unit pengatur operon.
9. Pertumbuhan dan pembelahan sel merupakan serangkaian kejadian teratur yang disebut juga siklus sel. Durasi setiap tahap dari siklus sel ini bervariasi tergantung jenis sel. Sebagian besar waktu sebelum pembelahan sel berada dalam tahap interfase, yaitu periode pertumbuhan sebelum replikasi DNA. Sel saraf yang matur akan berada dalam interfase secara permanen karena saraf tidak membelah. Mitosis atau fase pembelahan merupakan sebagian kecil dari keseluruhan siklus.
10. Siklus kehidupan lengkap sel yang tidak dihambat berlangsung sekitar 10 sampai 20 jam dari pembelahan ke pembelahan, dan periode mitosis berakhir kira-kira satu setengah jam. Akan tetapi, dalam tubuh hampir selalu terdapat pengawasan penghambatan yang memperlambat atau menghentikan siklus hidup sel yang tidak dihambat dan mengakibatkan periode siklus hidup sel bervariasi.

Soal latihan

1. Kemungkinan yang dapat merubah mutasi adalah: (1) ----, (2) ----, (3) ----, (4) ----, dan (5) ----
2. Perbedaan antara mitosis dan meiosis adalah ...
3. Durasi siklus sel bervariasi. Durasi siklus sel yang berlangsung 2 – 3 jam terjadi pada:
 - a. Sum-sum tulang
 - b. Eritrosit
 - c. Sel saraf
 - d. Sperma atau ovum
 - e. Neutrofil
4. Kodon yang sesuai dengan asam amino alanin adalah
 1. GCU
 2. 3. GCC
 3. GCA
 4. 4. AGA
5. Kodon yang berhubungan dengan proses dimulainya sintesis protein di ribosom adalah:
 1. AUG
 2. UAA
 3. GUG
 4. UGA

Bacaan Lebih Lanjut

1. *Anatomy and Physiology* (8th edn). McGraw-Hill Co., 2004. p. 58 – 99.
2. *Fox Human Physiology*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2003. p. 50 – 80.
3. Guyton, AC and Hall, JE. (2006). (11th edn). *Textbook of Medical Physiology*. Elsevier Saunders, Philadelphia. p. 30 – 40.
4. James, J. Baker, C. Swain, H. 2002. *Prinsip-Prinsip Sains untuk Keperawatan*. Edisi Bahasa Indonesia. Penerbit EMS. h. 77 – 91; 92 – 108.
5. Sherwood, L. (2010). *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA. p. 21 – 52; 53 – 81.
6. *Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 91 – 114.

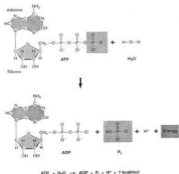
BAB 6 ATP dan Fosforilasi Oksidatif

Sasaran Pembelajaran

Pada akhir bab ini pembaca akan mampu untuk:

1. Menjelaskan struktur melekat ATP dan energi yang dikeluarkannya bila terjadi hidrolisis.
2. Menjelaskan proses pembentukan ATP di sistem transport elektron (fosforilasi oksidatif) di mitokondria.
3. Menguraikan proses pembentukan ATP melalui jalur glikolisis anaerobik
4. Menguraikan proses pembentukan ATP dari karbohidrat dan sejumlah ATP yang dihasilkan pada sitosol, siklus Krebs dan sistem transpor elektron di mitokondria.
5. Menguraikan proses pembentukan ATP dari lemak dan sejumlah ATP yang dihasilkan.
6. Menguraikan jalur metabolisme lemak, protein dan karbohidrat.

Sumber energi bagi tubuh adalah energi kimia yang tersimpan sebagai ikatan-ikatan karbon-hidrogen dalam makanan yang dimakan. Akan tetapi, sel tubuh tidak memiliki perangkat untuk menggunakan energi ini secara langsung. Sel harus mengekstraksi energi dari makanan ini dan mengubahnya menjadi suatu energi yang dapat digunakan – yaitu, dalam bentuk ikatan fosfat berenergi tinggi, ATP (adenosine triphosphate). ATP adalah suatu nukleotida yang terdiri dari molekul adenin (basis organik), gula ribosa pentosa, dan rantai anorganik yang terdiri dari tiga gugus fosfat. ATP disintesis dari adenosin difosfat (ADP) dalam sel tubuh (Gambar 6.1).



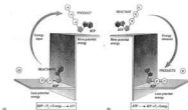
Gambar 6.1 Struktur Adenosine Triphosphate (ATP) dan Hidrolisis ATP

(Disalin dari Vander Hamen *Physiology: The Mechanism of Body Function*, (9th edn), McGraw-Hill Co., 2001, p. 64).

Sintesis ATP

Sintesis ATP dari ADP membutuhkan tambahan satu gugus fosfat, dan proses penambahan fosfat ini disebut fosforilasi. Proses pembentukan ikatan kimia ini membutuhkan energi dan disebut endergonik. Ketika energi dibutuhkan oleh tubuh, ATP akan dihidrolisis oleh enzim ATPase, dimana ikatan fosfat pada ujung molekul akan dipecah dan proses ini melepaskan sejumlah energi. Reaksi melepaskan energi ini disebut eksergonik. Gugus fosfat kedua juga dapat dilepaskan

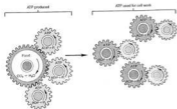
dari ATP sehingga terbentuk AMP (adenosin monofosfat), di mana pembentukannya akan melepaskan sejumlah energi yang sama besar. Untuk memperoleh energi segera, sel memutuskan ikatan fosfat terminal di ATP, yang menghasilkan ADP (Adenosine diphosphate) + Pi dan energi untuk digunakan oleh sel. Misalnya, untuk transpor aktif ion, kontraksi otot, sintesis molekul-molekul, pembelahan sel dan pertumbuhan sel (Gambar 6.2b).



Gambar 6.2 Reaksi kimia $ADP + P_i \leftrightarrow ATP$

(Disalin dari *Anatomy and Physiology* (9th edn), McGraw-Hill Co., 2004, p. 38).

Sebaliknya, dengan adanya oksidasi bahan makanan (karbohidrat, lemak dan protein) diperoleh energi untuk membentuk kembali ATP dari ADP, dengan cara mengikatkan kembali Pi sehingga menjadi ATP; $ADP + P_i + \text{Energi} \rightarrow ATP$ (Gambar 6.2a). Molekul makanan seperti glukosa akan dipecah dalam tubuh melalui serangkaian reaksi yang dikatalisis oleh enzim. Setiap reaksi melepaskan sejumlah energi. Sebagian dari energi ini akan disimpan sementara dalam bentuk molekul ATP, sedangkan sisanya akan dilepas sebagai panas.



Gambar 6.3 Reaksi $ADP + P_i \leftrightarrow ATP$ menjembatani antara produksi dan penggunaan energi dalam tubuh

(Diadaptasi dari *For Human Physiology*, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2003, p. 96).

ATP tidak dapat diproduksi dan disimpan dalam jumlah banyak. Sehingga penyimpanan energi dalam bentuk ATP hanya bersifat sementara, tidak seperti penyimpanan cadangan energi dalam bentuk lemak dan glikogen, ATP lebih bersifat pembawa energi. Ketika cadangan ATP menjadi berkurang, ATP dapat disintesis lagi dari ADP di dalam sel. Jadi, penggunaan energi dan pembentukan energi dalam tubuh dijumpai oleh ATP. Sel tubuh menggunakan energi dalam bentuk ATP, dan memproduksi energi dalam bentuk ATP (Gambar 6.3).

Satuan energi

Satuan *Systeme International* (SI) untuk energi adalah joule (J). Joule adalah satuan yang sangat kecil, sehingga untuk lebih mudah seringkali digunakan satuan kilojoule (kJ) (1 kJ = 1000 J).

Satuan energi yang lama adalah kalori (calorie, c). Kalori adalah energi yang diperlukan untuk meningkatkan suhu 1 g air sebanyak

1°C. Kalori juga merupakan satuan yang sangat kecil sehingga untuk mempermudah digunakan kalori makanan (kalori) atau kilokalori (1 kalori makanan = 1000 kalori); Kalori ditulis dengan singkatan Kal. Kedua satuan ini masih digunakan hingga sekarang dan Kal dapat dikonversi menjadi kilojoule dengan mengalikan dengan 4,183. Nilai energi protein = 4 Kal/gram, karbohidrat = 4 Kal/gram dan lemak = 9 Kal/gram. Nilai energi untuk lemak, kira-kira dua kali lipat nilai karbohidrat dan protein.

Nutrisi

Nutrien (zat gizi) adalah komponen kimia dalam makanan yang digunakan oleh tubuh sebagai sumber energi dan membantu pertumbuhan, perbaikan, dan perawatan sel tubuh. Terdapat enam kelas zat gizi:

- Protein
 - Karbohidrat
 - Lemak
 - Vitamin
 - Mineral
 - Air
- } makronutrien
- } mikronutrien

Setiap jenis makanan memberikan sesuatu yang berbeda dan diet yang seimbang mengandung semua jenis nutrisi dalam jumlah yang cukup untuk mempertahankan kesehatan.

Metabolisme

Dalam pengertian umum, metabolisme adalah semua reaksi biokimia yang terjadi dalam tubuh untuk mempertahankan hidup. Sebagian reaksi biokimia akan membentuk molekul-molekul besar dari molekul kecil artinya bersifat sintetik, dan disebut juga anabolik, misalnya pembentukan glikogen dari glukosa. Reaksi anabolik membutuhkan energi

karena terjadi pembentukan ikatan kimia. Reaksi lainnya akan memecah senyawa yang kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana; reaksi ini disebut katabolik, misalnya pencernaan. Pada reaksi katabolik, energi akan dilepaskan karena terjadi pemecahan ikatan kimia. Sebagian energi akan dilepaskan sebagai panas dan digunakan untuk menjaga kehangatan tubuh sebagian lainnya digunakan untuk membentuk ATP dari ADP. Reaksi katabolik dan anabolik terjadi pada saat yang bersamaan dalam sel dan ATP-lah yang membawa energi antara reaksi-reaksi tersebut.

Semua reaksi katabolik yang terjadi dalam sel disebut respirasi selular. Jika respirasi selular membutuhkan oksigen, maka disebut juga respirasi aerobik. Jika respirasi selular terjadi tanpa adanya oksigen, maka disebut respirasi anaerobik.

Reaksi respirasi selular

Sejumlah besar reaksi metabolik dalam sel melibatkan reaksi oksidasi dan reduksi. Awalnya oksidasi didefinisikan sebagai reaksi penambahan atom oksigen atau pelepasan atom hidrogen. Saat ini digunakan definisi yang lebih luas, oksidasi didefinisikan sebagai pelepasan elektron. Jika suatu zat dioksidasi, maka akan terjadi pelepasan energi karena pelepasan elektron berenergi tinggi. Reaksi reduksi adalah reaksi kimia yang berlawanan dengan reaksi oksidasi, yaitu reaksi penambahan atom hidrogen atau pelepasan atom oksigen. Reaksi reduksi juga dapat didefinisikan sebagai reaksi penambahan elektron. Jika suatu zat mengalami reduksi, berarti zat tersebut mendapatkan energi karena tambahan elektron berenergi tinggi.

Jika suatu zat dioksidasi dalam suatu reaksi, maka zat yang lain akan mengalami reduksi sehingga reaksi oksidasi dan reduksi selalu terjadi bersama-sama, seperti halnya siang dan malam. Istilah redoks merupakan singkatan dari reaksi reduksi-oksidasi.

Reaksi redoks dalam tubuh dikatalisis oleh enzim. Enzim dehidrogenase akan menghilangkan atom hidrogen dari suatu senyawa, sedangkan enzim oksidase akan menambahkan atom oksigen. Sebagian

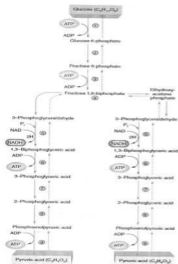
besar enzim ini membutuhkan koenzim yang umumnya diturunkan dari salah satu kelompok vitamin B. Dua zat yang paling penting adalah nikotinamid adenin dinukleotida (NAD⁺) dan flavin adenin dinukleotida (FAD⁺) - kedua zat ini masing-masing merupakan turunan dari niacin dan riboflavin.

Jalur metabolisme

Semua jalur metabolisme dalam tubuh dimulai dari pencernaan protein, lemak, dan karbohidrat, serta absorpsi zat hasil pencernaan. Kemudian, tubuh akan memproses zat gizi yang diabsorpsi melalui berbagai jalur metabolisme untuk menyediakan energi dan bahan mentah yang diperlukan.

Metabolisme karbohidrat. Semua karbohidrat akan dicerna menjadi glukosa. Glukosa memasuki sel tubuh bila terdapat insulin melalui difusi yang terfasilitasi. Ada beberapa tahap pemecahan glukosa, yaitu: (1) glikolisis, pemecahan glukosa atau glikogen menjadi asam piruvat, (2) konversi asam piruvat menjadi asetil koenzim A (asetil KoA), (3) siklus Krebs dan (4) rantai transpor elektron. Dari 1 molekul glukosa dihasilkan 38 ATP. Masing-masing 8 ATP (2 ATP dan 2 NADH) pada tahap glikolisis, 6 ATP (2 NADH pada tahap pembentukan acetyl coenzyme A), 24 ATP (2 ATP, 6 NADH dan 2 FADH₂) pada tahap siklus Krebs. Untuk satu molekul NADH dan FADH₂, masing-masing menghasilkan 3 ATP dan 2 ATP pada tahap rantai transpor elektron (Gambar 6.4).

Glikolisis. Glikolisis berarti 'pemecahan gula' dan terjadi dalam sitosol. Satu molekul glukosa terbagi menjadi dua molekul asam piruvat (piruvat). Perhatikan bahwa asam yang terbentuk pada reaksi ini akan berdisosiasi untuk memberikan anion pada tubuh, sehingga piruvat adalah anion dari asam piruvat, sehingga nama piruvat dan asam piruvat dapat saling menggantikan. Glikolisis tidak membutuhkan oksigen dan merupakan reaksi anaerobik. Terdapat tiga tahap utama glikolisis.



Gambar 6.4 Glikolisis dalam sitosol

(Diambil dari *For Human Physiology*, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2003, p. 106).

Gambar 6.4 menunjukkan bahwa glikolisis dari satu molekul glukosa menghasilkan 2 molekul asam piruvat dalam sitosol. Bila oksigen cukup, maka asam piruvat membentuk acetyl coenzyme A untuk masuk ke siklus Krebs di mitokondria (jalur aerobik, glikolisis aerobik). Bila terjadi insufisiensi oksigen atau tidak ada oksigen, maka asam piruvat justru membentuk asam laktat di sitosol (jalur anaerobik, glikolisis anaerobik).

Atom hidrogen yang terbentuk pada glikolisis tersebut dapat ditransfer ke pembawa hidrogen NAD^+ (nikotinamid adenin dinukleotida) yang akan mereduksinya menjadi $NADH + H^+$, yang selanjutnya akan diangkut ke sistem transportasi elektron di mitokondria bila oksigen cukup tersedia.

Asam piruvat yang terbentuk pada proses glikolisis di sitosol, selanjutnya akan diubah atau dikonversi menjadi asetil koenzim A (respirasi aerobik) bila oksigen cukup tersedia, dan bila oksigen tidak cukup dikonversi menjadi asam laktat (respirasi anaerobik).

Konversi asam piruvat menjadi asetil KoA (respirasi aerobik)

Asam piruvat yang masuk ke matriks cairan mitokondria akan mengalami pelepasan molekul karbon dioksida (dekarboksilasi) untuk membentuk senyawa asetil yang mengandung dua atom karbon. Jika terdapat oksigen, maka terjadi reaksi dengan koenzim A (CoA) yang kemudian membentuk asetil koenzim A (asetil KoA). Pada saat yang sama, dua atom hidrogen akan ditransfer ke akseptor hidrogen NAD^+ membentuk $NADH$ dan H^+ (Gambar 6.5).



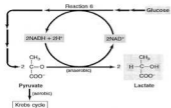
Gambar 6.5 Pembentukan asetil KoA dari asam piruvat

(Diambil dari *For Human Physiology*, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2003, p.108).

Respirasi anaerobik (reaksi fermentasi)

Pada tumbuh-tumbuhan dan jamur, produk akhir respirasi anaerobik adalah etanol. Akan tetapi, pada manusia dan hewan, produk akhir respirasi anaerobik adalah asam laktat.

Pada respirasi anaerobik, siklus Krebs atau rantai transfer electron tidak digunakan. Koenzim yang tereduksi (NADH + H⁺) tidak dapat melepaskan atom hidrogennya, sehingga atom hidrogen ini akan diberikan pada asam piruvat. Pada respirasi anaerobik ini, hanya terbentuk dua molekul ATP, yaitu yang terbentuk pada langkah ke-6 dari proses glikolisis di sitosol.



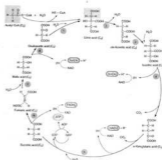
Gambar 6.6 Pembentukan asam laktat dari asam piruvat

(Disalin dari Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2001, p. 72).

Respirasi anaerobik terjadi pada otot manusia ketika sedang berolahraga berat. Disosiasi asam laktat akan memproduksi ion hidrogen yang akan menurunkan pH sel dan menyebabkan nyeri serta kelelahan otot. Olahraga teratur akan meningkatkan suplai darah, sehingga suplai oksigen ke otot juga meningkat dan periode aktivitas dapat berlangsung lebih lama.

Siklus Krebs. Sir Hans Krebs menerima hadiah Nobel untuk bidang Kedokteran pada tahun 1953 atas penemuan siklus asam sitrat atau siklus trikarboksilat (tricarboxylic, TCA). Siklus ini dinamakan sesuai nama beliau (Gambar 6.7).

Hal yang utama yang penting pada kajian siklus Krebs adalah: (1) siklus dimulai dengan pembentukan asam sitrat; asam sitrat ini terbentuk jika asetil KoA (2C) bergabung dengan asam oksaloasetat (4C), (2) asam sitrat yang terbentuk akan mengalami empat reaksi redoks dan dua reaksi dekarboksilasi untuk meregenerasi asam oksaloasetat sebelum siklus ini berulang, (3) produk akhir siklus Krebs untuk setiap asam pinivat adalah: 2 molekul karbon dioksida, 4 molekul koenzim tereduksi - 3NADH + H⁺ dan 1 FADH₂ dan 1 molekul ATP.



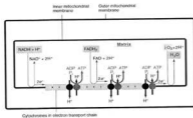
Gambar 6.7 Siklus Krebs

(Disalin dari Fox Human Physiology, [8th edn], McGraw-Hill Co., 2001, p.110).

Selama respirasi aerobik siklus Krebs akan terulang dua kali untuk setiap satu molekul glukosa sehingga disintesis 2 molekul ATP.

Rantai transpor elektron. Tahap akhir respirasi erobik adalah rantai transpor elektron. Pada tahap ini dibutuhkan oksigen. Rantai transpor elektron ini merupakan suatu seri reaksi reduksi dan oksidasi (redoks) yang terjadi di membran dalam kista pada mitokondria. Rantai ini terdiri dari serangkaian pembawa hidrogen dan elektron. Atom hidrogen atau elektron akan bergerak dari satu pembawa ke pembawa berikutnya. Bergerak ke bawah menurut jenjang energi. Pada setiap jenjang, energi akan dilepaskan dan digunakan untuk pembuatan ATP. Produk akhir rantai ini adalah molekul air (H_2O).

Terbentuk 3 molekul ATP untuk setiap molekul $NADH^+$ dan 2 ATP untuk setiap $FADH_2$. Jadi, dari 10 molekul $NADH^+$ dan 2 $FADH_2$, terbentuk 34 molekul ATP. Pembentukan ATP ini disebut fosforilasi oksidatif.



Gambar 6.8 Rantai transpor elektron

[Disalin dari Vander Harton Physiology: The Mechanism of Body Function, (8th edn). McGraw Hill Co., 2001, p. 76].

Ketika atom hidrogen yang dibebaskan selama proses penguraian molekul nutrient yang mengandung karbon oleh siklus Krebs di matriks mitokondria dibawa ke membran dalam dari mitokondria oleh pengangkut hidrogen, misalnya $NADH$ atau $FADH_2$, mencapai koenzim Q, maka setelah membebaskan hidrogen di membran dalam, NAD atau FAD bergerak balik untuk mengambil kembali hidrogen yang dihasilkan oleh siklus Krebs di matriks. Sementara itu, elektron-elektron energi tinggi yang diekstraksi dari hidrogen dilewatkan melalui rantai transport elektron yang terletak di membran dalam mitokondria.

Sewaktu elektron mengalir dari tingkat energi tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah, dibebaskan sejumlah energi secara bertahap melalui reaksi-reaksi pada rantai transport elektron. Molekul oksigen yang berfungsi sebagai akseptor terakhir dari elektron berikatan dengan ion hidrogen (H^+) yang dihasilkan dari hidrogen pada saat ekstraksi elektron energi tinggi, membentuk H_2O (air).

Energi yang dibebaskan selama transfer elektron oleh rantai transport elektron tersebut, digunakan untuk memindahkan ion hidrogen dari matriks ke ruang antarmembran. Selanjutnya, ion-ion hidrogen yang menumpuk di ruang antarmembran menyebabkan aliran ion hidrogen dari ruang antarmembran ke matriks melalui saluran khusus di membrane dalam mitokondria. Aliran ion hidrogen melalui saluran yang pada akhirnya mengaktifkan enzim sintase ATP diujung saluran. Aktifnya enzim sintase ATP menyebabkan terbentuknya ATP dari ADP dan P_i di matriks mitokondria.

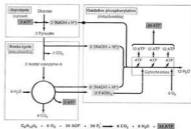
Jadi, pembawa terakhir dalam rantai ini adalah oksigen dan rantai transpor elektron hanya dapat berlangsung dengan adanya oksigen. Rantai transpor elektron dapat dihambat oleh racun seperti karbon monoksida dan sianida serta obat-obatan tertentu.



Gambar 6.9 Pembentukan ATP pada sistem transpor elektron

(Disalin dari Fox Human Physiology, [8^e edn], McGraw Hill Co., 2003, p. 111).

Jadi, metabolisme karbohidrat memproduksi 38 molekul ATP, yaitu: 2 molekul ATP dari glikolisis di sitosol, 2 molekul ATP dari siklus Krebs dan 34 molekul ATP dari rantai transpor elektron.

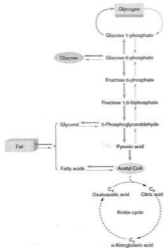


Gambar 6.10 Ringkasan jalur pembentukan ATP dari glukosa

(Disalin dari Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function, [8^e edn], McGraw-Hill Co., 2001, p. 78).

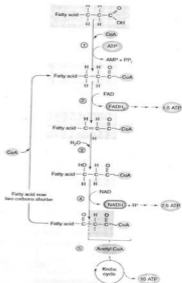
Metabolisme lemak

Lemak merupakan nutrisi yang paling banyak mengandung energi tubuh. Merupakan sumber energi bagi otot dan jaringan lainnya, kecuali sel-sel otak. Sel-sel otak hanya menggunakan glukosa sebagai sumber energi. Dua produk pemecahan lemak yaitu: giserol dan asam lemak. Dalam sel, giserol dapat dikonversi menjadi giseraldehid-3-fosfat; suatu zat antara pada glikolisis. Giserol yang difosforilasi dapat memasuki jalur glikolisis di mana terjadi konversi menjadi asam piruvat sebelum memasuki siklus Krebs. Asam lemak bebas melalui oksidasi β menjadi asetil KoA untuk selanjutnya memasuki siklus Krebs (Gambar 6.11).



Gambar 6.11 Metabolisme lemak

(Disalin dari Fox Human Physiology, [8th edn], McGraw Hill Co., 2003, p. 114).

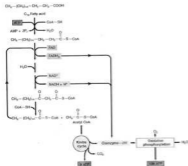


Gambar 6.12 Oksidasi β

(Disalin dari Fox Human Physiology, [8th edn], McGraw Hill Co., 2003, p. 93).

Asam lemak mengalami oksidasi beta di hati membentuk asetil KoA. Asetil KoA dapat langsung memasuki siklus Krebs, tidak perlu melalui jalur glikolisis. Reaksi ini disebut juga sebagai β oksida karena yang dioksidasi adalah atom karbon kedua dari ujung asam pada rantai asam lemak. Atom karbon kedua ini disebut juga karbon β (beta).

Oksidasi β akan memecah dua atom karbon dari rantai asam lemak, misalnya: asam lemak 18C asam lemak 16C. Jumlah energi yang dilepaskan dari proses oksidasi-beta tergantung dari panjang rantai asam lemak - asam stearat (18C) akan menghasilkan 146 ATP, asam palmitat (16C) akan menghasilkan 129 ATP.



Gambar 6.13 Ringkasan pembentukan ATP dari Fatty Acid

(Disalin dari Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function, 8th edn, McGraw-Hill Co., 2001, p. 81)

Ketosis

Pada keadaan normal, sebagian besar asetil KoA yang terbentuk akan memasuki siklus Krebs. Akan tetapi, jika konsumsi karbohidrat sangat sedikit seperti pada kasus kelaparan atau diet ketat, atau jika glukosa tidak dapat digunakan seperti pada diabetes mellitus, maka metabolisme lemak akan meningkat sebagai kompensasi kekurangan glukosa. Masuknya asetil KoA ke siklus Krebs tergantung dari ketersediaan asam oksaloasetat, yang akan mengubah asetil KoA menjadi asam sitrat.

Defisit karbohidrat menyebabkan pembentukan asam oksaloasetat berkurang dan oksidasi lemak menjadi tidak lengkap. Selain itu oksidasi lemak untuk produksi energi akan menyebabkan produksi asetil KoA yang berlebihan. Kelebihan asetil KoA yang terakumulasi dalam sel akan ditranspor ke hati, di mana terjadi konversi asetil KoA menjadi badan keton; aseton, asam asetoasetat, dan asam 3-hidroksibutirat. Proses ini disebut juga ketogenesis. Akumulasi badan keton dalam tubuh disebut ketosis atau ketoasidosis. Karena sebagian besar badan keton bersifat asam, maka ketosis menyebabkan asidosis metabolik.

Adapun tanda dan gejala ketosis antara lain: (1) napas cepat dan dalam (pernapasan Kussmaul), (2) napas berbau seperti buah, (3) keton terdapat dalam urin (ketonuria), (4) pH darah menurun, dan (5) koma.

Metabolisme protein

Asam amino tidak disimpan dalam tubuh, akan tetapi asam amino dapat dimodifikasi dan digunakan untuk respirasi selular. Di hati asam amino akan mengalami deaminasi. Gugus amino ($-NH_2$) akan dilepas dari setiap asam amino dan rantai karbon akan dioksidasi menjadi asam, misalnya alanin akan dikonversi menjadi asam piruvat sedangkan asam aspartat menjadi asam oksaloasetat - kemudian asam piruvat dan asam oksaloasetat ini memasuki jalur metabolisme karbohidrat (Gambar 6.14). Gugus amino pada awalnya akan dikomersi menjadi amonia kemudian diubah menjadi urea, yang kemudian diekskresi di urin.



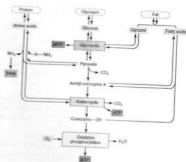
Gambar 6.14 Metabolisme protein

(Disalin dari Fox Numan Physiology, 8th edn, McGraw-Hill Co., 2003, p.138)

Pengeluaran energi

Pengeluaran energi oleh tubuh dapat digolongkan ke dalam dua kategori: yaitu: (1) kerja eksternal dan (2) kerja internal. Kerja eksternal adalah energi yang dikeluarkan ketika otot rangka berkontraksi untuk memindahkan benda eksternal atau menggerakkan tubuh dalam hubungannya dengan lingkungan. Kerja internal adalah semua bentuk pengeluaran energi biologis lain yang tidak melakukan kerja mekanik di luar tubuh. Kerja internal mencakup dua kativitas yang terkait energi: (1) aktivitas otot rangka yang digunakan untuk tujuan selain kerja eksternal, kontraksi untuk mempertahankan postur dan menggigit, (2) semua

aktivitas yang mengeluarkan energi yang harus berlangsung hanya untuk mempertahankan kehidupan, misalnya: untuk memompa darah dan bernapas, memindahkan bahan-bahan yang penting menembus membran plasma, dan energi yang digunakan selama reaksi sintesis yang esensial untuk pemeliharaan, perbaikan dan pertumbuhan struktur sel yang dikenal sebagai "biaya metabolik untuk hidup".



Gambar 6.15 Kaitan antara metabolisme KH, lemak dan protein

(Disalin dari Hender Numan Physiology: The Mechanism of Body Functions, 8th edn, McGraw-Hill Co., 2003, p.85)

Tabel 6.1 Kandungan kalori untuk individu dengan berat badan 70 kg

Makronutrien	Kandungan dalam tubuh	Kandungan Energi (kcal/g)	Kandungan energi total	
	(kg)		(kcal)	(%)
Trigliserida	15,6	9	140,000	78,0%
Protein	9,5	4	38,000	21,0%
Karbo	0,5	4	2,000	1,0%

(Disalin dari *Vander Hamon Physiology: The Mechanism of Body Function*, (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 80).

Ringkasan

1. ATP adalah suatu nukleotida yang terdiri dari molekul adenin (basa organik), gula ribosa pentosa, dan rantai anorganik yang terdiri dari tiga gugus fosfat. ATP disintesis dari adenosin difosfat (ADP) dalam sel tubuh.
2. Glukosa memproduksi 38 molekul ATP, yaitu: 2 molekul ATP dari glikolisis di sitosol, 2 molekul ATP dari siklus Krebs dan 34 molekul ATP dari rantai transpor elektron.
3. Oksidasi β akan memecah dua atom karbon dari rantai asam lemak, misalnya: asam lemak 18C asam lemak 16C. Jumlah energi yang dilepaskan dari proses oksidasi-beta tergantung dari panjang rantai asam lemak - asam stearat (18C) akan menghasilkan 146 ATP, asam palmitat (16C) akan menghasilkan 129 ATP.

4. Pembentukan ATP di sistem transport elektron mitokondria disebut fosforilasi oksidatif. Terbentuk 3 molekul ATP untuk setiap molekul NADH^+ dan 2 ATP untuk setiap FADH_2 . Jadi, dari 10 molekul NADH^+ dan 2 FADH_2 , terbentuk 34 molekul ATP.
5. Akumulasi badan keton dalam tubuh disebut ketosis atau ketoasidosis. Karena sebagian besar badan keton bersifat asam, maka ketosis menyebabkan asidosis metabolik. Adapun tanda dan gejala ketosis antara lain: (1) napas cepat dan dalam (pernapasan Kussmaul), (2) napas berbau seperti buah, (3) keton terdapat dalam urin (ketonuria), (4) pH darah menurun, dan (5) koma.

Soal latihan

1. Untuk memperoleh energi segera, sel memutuskan ikatan fosfat terminal di ATP, yang menghasilkan ADP (Adenosine diphosphate) + Pi dan energi untuk digunakan oleh sel. misalnya, urtik: (1) ..., (2) ..., (3) ..., dan (4) ...
2. Tanda ketosis antara lain adalah: (1) ..., (2) ..., (3) ..., (4) ... Dan (5) ...
3. Reaksi yang membutuhkan ATP adalah
 1. Phosphoenolpyruvic acid menjadi pyruvic acid
 2. Glukosa menjadi glukosa-6-fosfat
 3. 1,3 - biphosphoglyceric acid menjadi 3 - phosphoglyceric acid
 4. Fruktosa-6-fosfat menjadi fruktosa - 1,6 - bifosfat
4. Giserol masuk ke siklus Krebs melalui:
 - a. Glukosa-6-fosfat
 - b. 3-fosfoglisaratdehid
 - c. Oksaloasetat
 - d. Fruktosa-6-fosfat
 - e. Pyruvic acid

5. Asam amino yang masuk ke siklus Krebs melalui α -ketoglutarat adalah :

1. Arginin
2. Glutamat
3. Glutamin
4. Prolin

Bacaan Lebih Lanjut

1. *Anatomy and Physiology* (6th edn). McGraw-Hill Co., 2004. p. 26 – 57.
2. *Fox Human Physiology*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2003. p. 93 – 101; 103 – 123.
3. James, J. Baker, C. Swain, H. 2002. *Prinsip-Prinsip Sains untuk Keperawatan*. Edisi Bahasa Indonesia. Penerbit EMS. h. 157 – 176.
4. Sherwood, L. (2010). *Human Physiology: from Cells to Systems* (7th edn). Brooks/Cole, USA. p. 21 – 52; .
5. *Vander Human Physiology: The Mechanism of Body Function*. (8th edn). McGraw-Hill Co., 2001. p. 60 – 89.