

412

ACADEMIC CURRICULUM DEVELOPMENT

BUKU AJAR

ILMU FAAL METABOLISME



Oleh:

Bambang Sudarmoyo

UPT-PUSTAK-UNIP

No. Daft: D157/BA/PP/C1

Tgl. : 22 - 7 - 2007

Program Studi Produksi Ternak
Fakultas Peternakan
Universitas Diponegoro
Semarang
2007

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|---------|
| 1. SEL | 1 |
| Sitoplasma | 2 |
| Pusat sel | 5 |
| Nukleus | 5 |
| Kerangka sel | 6 |
| Modifikasi permukaan | 7 |
| Pertautan antar sel | 7 |
| Penunjang sel | 8 |
| Penjuluran permukaan sel | 8 |
| Sifat kimiawi sel | 9 |
| Sifat fisik protoplasma | 12 |
| Bioelektrik | 14 |
| Latihan | 15 |
| 2. ENZIM | 16 |
| Tatanama | 16 |
| Sintesis enzim | 17 |
| Sifat Kimia dan Fisik | 17 |
| Mekanisme Kerja Enzim | 19 |
| Faktor-faktor aktivitas enzim | 22 |
| Hambatan kerja enzim | 23 |
| Faktor yang mempengaruhi pembentukan enzim | 24 |
| Sifat dan mekanisme pengaturan enzim | 25 |
| Latihan | 25 |
| 3. KATABOLISME DAN ANABOLISME | 26 |
| Penggandengan reaksi-reaksi kimia di dalam sel | 26 |
| Oksidasi dan produksi energi | 28 |
| Konversi energi | 28 |
| Pernafasan sel | 28 |
| Pernafasan karbohidrat | 29 |
| Jalur pentosa | 32 |
| Hasil energi proses pernafasan | 32 |
| Bahan bakar untuk pernafasan | 33 |
| Pernafasan anaerobik pada beberapa bakteri | 35 |
| Fotosintesis | 35 |
| Mitokondria dan pernafasan sel | 36 |
| Penggunaan energi dalam proses nonbiosintetik | 37 |
| Transpor nutrisi | 37 |
| Penggunaan energi dalam proses sintesis | 38 |
| Mekanisme sintesis ATP | 40 |
| Latihan | 41 |
| 4. METABOLISME ENERGI | 42 |
| Pemasukan dan penggunaan energi hewan | 42 |
| Pernafasan seluler | 42 |
| Pengukuran energi metabolisme | 43 |
| Satuan energi | 44 |
| Metabolisme aerobik dan anaerobik | 44 |
| Laju metabolisme basal | 45 |

| | |
|--|----|
| Ukuran badan | 45 |
| Hubungan antara laju metabolisme dengan ukuran badan | 46 |
| Faktor-faktor laju metabolisme | 47 |
| Latihan | 50 |

DAFTAR TABEL

| | | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Tabel 1. | Skema fungsi dan contoh sel | 1 |
| Tabel 2. | Senyawa organis dalam protoplasma sel hewan | 9 |
| Tabel 3. | Unsur kimia pada protoplasma sel hewan | 9 |
| Tabel 4. | Ion-ion dalam protoplasma | 10 |
| Tabel 5. | Skema sifat kelarutan dan ukuran partikel larutan, koloid, dan suspensi | 13 |
| Tabel 6. | Klasifikasi enzim dan reaksi katalitiknya | 16 |
| Tabel 7. | Beberapa vitamin beserta bentuk-bentuk koenzimnya | 18 |
| Tabel 8. | Energi aktivasi beberapa reaksi | 21 |
| Tabel 9. | Beberapa senyawa energi-tinggi dalam sel, serta perubahan energi-bebas bila mengalami hidrolisis | 27 |
| Tabel 10. | Persamaan reaksi kimia proses pembakaran | 32 |
| Tabel 11. | Hasil energi setiap molekul glukosa dalam proses pernafasan sel | 33 |
| Tabel 12. | Asam amino penyusun protein, beserta singkatan-singkatan bakunya | 38 |
| Tabel 13. | Produksi energi per hari berdasar bobot badan dan luas permukaan badan | 46 |
| Tabel 14. | Oksidasi campuran karbohidrat dan lemak badan | 49 |
| Tabel 15. | Pengaruh puasa terhadap RQ | 50 |

DAFTAR ILUSTRASI

| | | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Ilustrasi | 1. Skema pembentukan apoenzim dan koenzim menjadi holoenzim serta sifat-sifatnya | 17 |
| Ilustrasi | 2. Skema pengikatan substrat pada situs aktif permukaan molekul enzim. | 20 |
| Ilustrasi | 3. Hubungan antara kecepatan reaksi dengan tingkat energi yang diperlukan bagi suatu reaksi | 21 |
| Ilustrasi | 4. Pengaruh konsentrasi enzim, konsentrasi substrat, pH, dan suhu terhadap aktivitas enzim | 22 |
| Ilustrasi | 5. Hubungan antara keragaman konsentrasi glutamat dekarboksilase dengan glutamat deaminasi pada <i>E. coli</i> | 24 |
| Ilustrasi | 6. Skema proses glikolisis | 30 |
| Ilustrasi | 7. Skema siklus Krebs | 31 |
| Ilustrasi | 8. Skema aliran hidrogen pada rantai pernafasan | 32 |
| Ilustrasi | 9. Skema proses pernafasan | 33 |
| Ilustrasi | 10. Bahan bakar dalam proses pernafasan sel | 36 |
| Ilustrasi | 11. Skema konsep transpor aktif | 39 |
| Ilustrasi | 12. Skema sintesis protein | 40 |

1. SEL

Secara mikroskopis, jaringan mamalia tersusun atas sel, bahan interseluler, dan cairan jaringan. Sel merupakan satuan struktur yang terkecil dipandang dari sudut fungsi (faali), pertumbuhan dan perkembangan, faktor herediter, dan regenerasi kehidupan. Ada interfungsi dan koordinasi di antara berbagai sel tubuh.

Fungsi umum sel adalah:

1. Melakukan metabolisme, yang meliputi asimilasi, oksidasi (pernafasan), dan pembuangan sisa metabolit.
2. Melakukan gerakan, yaitu kontraksi atau gerak amuboid.
3. Melakukan reaksi terhadap rangsangan, yang meliputi fototaksis, kemotaksis, dan hidrotaksis.

Setiap sel, mungkin hanya mempunyai satu fungsi saja, tetapi mungkin juga beberapa fungsi. Lihat Tabel 1.

Tabel 1. Skema fungsi dan contoh sel.

| Fungsi | Contoh sel |
|--|---|
| Gerak | Sel otot |
| Konduksi arus listrik | Sel syaraf |
| Sintesis dan akumulasi protein | Sel asinar pankreas |
| Sintesis dan akumulasi bahan mukosa | Sel kelenjar mukosa |
| Sintesis dan akumulasi bahan steroid | Beberapa sel kelenjar adrenal, testis, dan ovaria |
| Transportasi ion | Sel ginjal dan saluran kelenjar saliva |
| Pencernaan intrasel | Sel makrofagi, dan beberapa sel darah putih |
| Transformasi stimulasi fisik dan kimia menjadi impuls syaraf | Sel sensori |
| Penyerapan metabolit | Sel usus, dan ginjal |

Diameter sel mamalia amat berragam; sel eritrosit, misalnya, 6-8 mikron, trombosit 3-4 mikron, monosit 15-20 mikron, dan sel telur mamalia 100-150 mikron. Panjang sel juga berragam; sel otot polos 15-200 mikron (pada uterus gravid mencapai 500 mikron atau 0,5 mm), sedang sel otot kerangka beberapa cm, sehingga disebut serabut.

Sel terdiri atas nukleus dan sitoplasma, dan dibungkus oleh membran plasma. Di dalam sitoplasma terdapat berbagai organela. Secara skematik, unsur penyusun sel adalah seperti berikut.

1. Sitoplasma, yang mempunyai:

- 1.1. Membran plasma,
- 1.2. Hialoplasma (*matrix* *cytoplasm*)
- 1.3. Fraksi supernatan
- 1.4. Organela
- 1.5. Paraplasma

mitochondria
golgi apparatus
lysosomes
peroxisomes
 1 - *ribosomes*
 - *endoplasmic reticulum*

organela
mitochondria
golgi apparatus
lysosomes
peroxisomes

2. Pusat sel
3. Inti sel, yang mempunyai:
 - 3.1. Dinding inti
 - 3.2. Nukleoplasma,
 - 3.3. Karyosoma,
 - 3.4. Nukleoli

Sitoplasma

Sel bakteri memang mengandung DNA, tetapi tidak mempunyai nukleus, membran nukleus dan kromosoma. Sel-sel seperti ini disebut prokaryotis, sedang sel yang mengandung nukleus dan kromosom disebut eukaryotis.

Di dalam sitoplasma terdapat berbagai membran dan bahan lain yang diselubungi membran.

* **Membran plasma.** Membran plasma atau membran sel (plasmalemma, cytolemma atau osmotic membrane) amat tipis, dan elastis. Terdiri atas dua selaput yang dipisahkan oleh satu celah. Bersifat selektif permeabel (tergantung kadar lipida yang ada di dalam membran), sehingga dapat mengatur kadar ion di dalam dan di sekeliling sel dan mengandung enzim.

Pada tanaman, terdapat dinding sel (yang berfungsi seperti tulang pada hewan) di luar membran sel.

* **Hialoplasma.** Hialoplasma (cytoplasmic matrix) adalah sitoplasma yang berisi inti sel, organel, paraplasma, dan bahan cair. Terdiri atas molekul protein yang berikatan (anastomoses).

Pada hialoplasma terdapat ektoplasma dan endoplasma. Ektoplasma berada di sebelah tepi, konsistensinya sebagai gel, tidak berisi organel maupun paraplasma. Gel dapat berubah menjadi sol dan sebaliknya.

Endoplasma adalah sitoplasma di bagian dalam sel, lebih cair daripada ektoplasma, dan pada sel hidup tampak adanya aliran sitoplasma. Perubahan gel menjadi sol dan sebaliknya tidak aktif. Hialoplasma berisi organel dan paraplasma.

* **Fraksi supernatan.** Fraksi supernatan (fraksi cair) terdiri atas air, serta garam dan bahan organik yang larut di dalamnya.

* **Organela.** Organela (cytoplasmic organelle) amat penting dalam proses metabolisme sel. Organela terdapat di dalam hialoplasma yang terdiri atas protein (termasuk macam-macam enzim), lipida, dan karbohidrat. Struktur organela dapat terdiri atas bahan murni atau kombinasi (lipoprotein, glikoprotein, proteoglikan, atau mukoprotein), serta berbagai bahan anorganik (ion Ca, Na, K).

Terdapat atas mikrosoma (retikulum endoplasma dan benda-benda ribonukleoprotein), aparatus Golgi, mitokondria, dan fibril.

* **Retikulum endoplasma dan ribosom.** Dalam sitoplasma semua sel, utamanya sel yang mensintesis protein, terdapat suatu sistem yang terdiri atas saluran-saluran yang diselaputi oleh membran; yang disebut retikulum endoplasma, tebalnya 80 milimikron.

Ada dua macam retikulum endoplasma, yaitu retikulum endoplasma kasar (rough endoplasmic reticulum, rER), dan retikulum endoplasma halus (smooth endoplasmic reticulum, sER).

Retikulum endoplasma kasar berfungsi untuk:

1. Biosintesis protein untuk keperluan intra dan ekstra selular (misalnya untuk membentuk protein yang terkandung di dalam sekreta, lisosom, dan berbagai membran).

2. Glikosilasi protein menjadi glikoprotein. Glikosilasi terjadi pada sisi lumen selaput rER.

rER terdapat banyak pada sel-sel yang aktif mensintesis protein, misalnya sel asinus pankreas dan sel plasma.

Di dalam rER terdapat membran, yang pada permukaan luarnya terdapat partikel ribosoma. Ribosom terdiri atas subunit besar dan subunit kecil. Sebelum sintesis protein, kedua subunit itu terpisah. Sintesis protein di dalam ribosom dimulai dari proses pengikatan subunit yang kecil dengan subunit yang besar.

Retikulum endoplasma halus berperan dalam:

1. Sintesis hormon steroid (pada sel interstitial testis, korpus luteum, dan korteks kelenjar adrenal), sintesis kompleks lipida, resintesis lipida dalam sel-sel penyerap di usus halus
2. Melepas dan menangkap ion Ca pada otot kerangka, dan
3. Mengkonsentrasikan ion Cl dalam sel parietal lambung.

Sel mensintesis dua jenis bahan, yaitu bahan yang tetap berada di dalam sel dan bahan yang keluar dari sel melalui membran nukleus. Proses pengeluaran bahan ini disebut sekresi. Proses sekresi ini merupakan ciri utama, misalnya, pada sel kelenjar. Sel semacam sel kelenjar ini kaya akan rER.

✓ Benda ribonukleoprotein. Bahan ini berupa butiran, diameternya 10-15 milimikron yang melekat pada dinding luar retikulum endoplasma. Berasal dari nukleus yang keluar melalui pori-pori yang ada pada dinding nukleus. Pada sel yang cepat membelah, butiran ini tersebar di dalam sitoplasma.

✓ Aparatus Golgi. Aparatus Golgi (Golgi complex, atau internal reticular apparatus) terdiri atas lapisan-lapisan membran yang ujungnya dapat menggelembung. Fungsi aparatus Golgi adalah untuk melakukan sekresi protein.

Protein dari membran rER ditransfer ke aparatus Golgi. Di aparatus Golgi, butir protein dikonsentrasikan, lalu terbentuk gelembung (yang disebut transport vesicles) yang bergerak menuju permukaan sel, dan keluar dari sel melalui proses eksositosis. Setelah eksositosis, selaput gelembung yang rusak akan mengalami endositosis (pulih kembali). Dalam proses endositosis, terjadi pengambilan substrat dari sel ke dalam gelembung. Pengambilan substrat yang cair disebut pinositosis.

✓ Mitokondria. Mitokondria berukuran 0,2 - 0,3 mikron, jumlahnya amat bervariasi (ada yang jumlahnya 1000) tersusun atas lipoprotein. Sel darah merah tidak mengandung mitokondria.

Fungsi utama mitokondria adalah sebagai pusat respirasi (pernafasan), yaitu:

1. Menghasilkan katalisator oksidasi (enzim), misalnya dalam perubahan asam piruvat menjadi CO₂ dan H₂O
2. Sintesis ATP dari ADP dan energi
3. Mengandung enzim oksidasi (enzim sitokrom) yang berguna dalam siklus Krebs.

Karena merupakan sumber utama ATP, maka mitokondria terdapat banyak pada sel yang aktivitas metabolismenya tinggi dan sel hewan yang muda.

Di dalam sel, letak mitokondria tidak teratur dan selalu berpindah-pindah. Tetapi ada juga mitokondria yang tempatnya tetap, yaitu pada daerah yang konsumsi ATP-nya tinggi, misalnya pada daerah basal epitel tubuli konvulsi ginjal.

Mitokondria dapat pecah, tetapi dapat kembali ke asalnya (bersifat reversibel). Mitokondria mempunyai selaput ganda, yaitu selaput luar dan selaput dalam. Selaput dalam mitokondria membungkus rongga yang berisi matriks mitokondria; pada permukaannya terdapat partikel kompleks protein transmembran, yaitu ATP synthetase. Matriks mitokondria mengikat ion kalsium dan ion divalen yang lain.

Asam lemak dan asam piruvat (hasil akhir glikolisis di dalam sitoplasma), dibawa ke dalam matriks mitokondria, lalu dipecah oleh enzim mitokondria menjadi asetil CoA. Asetil CoA mengalami oksidasi enzimatis (dalam siklus TCA), menghasilkan CO₂ dan NADH. NADH adalah sumber utama elektron yang ditranspor sepanjang proses rantai pernafasan (respiration chain). Energi yang timbul selama transpor, dipakai untuk memompa proton dari matriks mitokondria ke dalam ruang antarmembran, sehingga timbul gradien (perbedaan) elektrokimia proton pada selaput dalam mitokondria. Proses ini akan mendorong proton kembali lewat ATP sintetase (atau; mensintesis ATP dari ADP dan P) ke dalam matriks mitokondria.

Fibril. Fibril terdiri atas miofibril dan neurofibril. Miofibril terdapat pada otot polos dan otot seran lintang. Pada neurofibril, fibril terdapat pada neuron. Setiap fibril terdiri atas banyak filamen.

Di samping organela seperti yang diuraikan di atas, masih dapat dijumpai beberapa organel lain, misalnya lisosom dan peroksisom.

Lisosom. Ada lisosom primer dan ada juga lisosom sekunder. Lisosom primer hanya berisi enzim hidrolitik (fosfatase, ribonuklease, protease), yang diselubungi oleh lipoprotein sehingga tidak bercampur dengan sitoplasma.

Molekul yang besar akan dihidrolisis oleh enzim sehingga dapat dioksidasi di dalam mitokondria. Jika membran lisosoma rusak, maka enzim keluar lalu menghidrolisis isi sel. Hal ini terjadi pada sel-sel yang telah tua.

Lisosom primer berasal dari sisterna aparatus Golgi. Setelah menjauh dari aparatus Golgi, dinding lisosom primer akan menipis, lalu melebur dengan heterofagosom, otofagosom, butir sekreta, dan gelembung endositik, membentuk lisosom sekunder.

Enzim lisosom primer aktif pada pH 5,0. Dinding lisosom tidak dapat dipecah oleh enzim lisosom primer tersebut, tetapi pada akhir heterofagi, otofagi, atau krinofagi, dinding lisosom sekunder pecah, isinya keluar. Isi lisosom sekunder ini dapat keluar dari sel atau tetap berada di dalamnya menjadi pigmen lipofuksin.

Peroksisom. Organela ini penting dalam penggunaan oksigen oleh sel, serta berguna dalam proses detoksikasi dan pemecahan asam lemak menjadi asetil CoA. Mengandung banyak enzim katalase dan hidrogen peroksida. Banyak dijumpai dalam hepatosit dan sel-sel epitel tubuli proksimalis ginjal.

Paraplasma. Paraplasma (atau cytoplasmic inclusion), amorf, bersifat mati, berisi butir sekreta, butir muko-protein, glikogen, lipida, dan pigmen dan lain-lain. Benda-benda ini dapat disekresikan dari sel.

Butir sekreta terdiri atas protein, proenzim, atau hormon. Pada sel asinus pankreas, butir sekreta keluar dalam bentuk cair.

- Butir muko-protein ada yang bersifat
1. Mukus (cair, misalnya yang disekresi oleh sel mangkuk),
 2. Muko-protein (misalnya yang disekresi oleh sel mast, dan sel beta pankreas).

Glikogen larut dalam air, diameternya 10-40 nm. Banyak terdapat dalam sel hati.

Lipida berada di sel-sel jaringan lemak (corpus adiposus), dan berbagai sel lain. Ukurannya bermacam-macam. Dapat dalam bentuk lipida sederhana (misalnya trigliserida yang terletak di antara sel-sel lemak), steroida (misalnya pada korpus luteum), dan lipida kompleks (misalnya di sekitar serabut syaraf otak, sumsum tulang belakang, dan syaraf perifer).

Pigmen ada dua macam, yaitu pigmen endogen dan eksogen. Pigmen endogen dibuat oleh tubuh sendiri, misalnya melanin, lipokrom, hemosiderin, dan lipofuksin. Sedang pigmen endogen berasal dari luar (makanan).

Melanin adalah pigmen yang berwarna coklat tua sampai hitam. Terdapat pada dinding bola mata dan kulit. Sel melanosit mengsekresi butiran melanin yang akan bergabung menjadi keratinosit.

Hemosiderin adalah pigmen hasil perusakan eritrosit, setelah difagositosis oleh sel makrofag di dalam limpa, hati, sumsum tulang, dan nodus hemal lymph. Pigmen ini berwarna kuning emas, mengandung zat besi.

Pigmen lipofuksin dijumpai pada sel hati, syaraf dan otot jantung. Lipofuksin adalah residu yang sulit dicerna (dipecah) pada proses fagositosis, otofagi, dan krinofagi.

Pigmen eksogen misalnya karotenoid (karotin, xantofil; lutein), dan butiran debu atau arang yang masuk lewat udara pernafasan yang akhirnya difagositasi oleh sel-sel debu (dust cells) di paru-paru.

Pusat sel

Pusat sel (cell center) terdiri atas satu atau dua butiran sentriol (centriole). Di sekitar sentriol terdapat sitoplasma yang agak pekat yang disebut sentrosoma. Selama pembelahan sel, sentrosoma dikelilingi oleh massa sentrosfer dengan benang radial (aster), sehingga disebut pusat sel.

Nukleus

Nukleus atau inti sel lebih pekat daripada sitoplasma; terdiri atas selubung inti, nukleoplasma, dan nukleoli. Berbentuk bulat, atau lonjong, tetapi ada juga yang seperti kacang atau bergelambir.

Pada pembelahan sel stadium interfase, nukleus mengandung kromatin, satu atau beberapa nukleolus yang berada di dalam nukleoplasma yang terbungkus oleh selubung inti (nuclear envelope). Nukleolus hanya terdapat pada saat sel tidak sedang membelah dan akan hilang pada saat membelah.

Nukleus diselaputi oleh dua membran; pada tempat tertentu kedua membran ini bertemu membentuk pori. Lewat pori inilah nukleus berhubungan dengan sitoplasma. Secara teratur nukleus mengatur proses-proses dalam sel dengan mengeluarkan RNA ke dalam sitoplasma.

Nukleus merupakan pembawa informasi tentang fungsi dan sifat organisme, karena mengandung DNA (deoxyribonucleic acid). DNA berperan dalam mengatur mRNA, tRNA dan sRNA. Bahan-bahan ini ditransfer ke dalam sitoplasma dan berfungsi dalam sintesis protein. Proses sintesis ini berlangsung pada stadium interfase dalam pembelahan sel.

Di dalam nukleus terdapat untaian kromatin. Untaian kromatin ini selama proses pembelahan sel, membentuk kromosom. Fungsi kromosom adalah menghasilkan bahan kimia khusus yang secara bertahap akan memasuki sitoplasma yang akan mengatur semua proses kimiawi yang berlangsung di dalam sitoplasma.

Di dalam kromosom terdapat DNA (deoxyribonucleic acid), sedang di dalam nukleus terdapat banyak RNA (ribonucleic acid); diduga nukleolus merupakan tempat sintesis RNA.

x Dinding inti. Selubung inti ((karyotaeca) terdiri atas dua lapis, yaitu lapis luar dan lapis dalam. Retikulum endoplasma dianggap sebagai penjururan selubung inti lapis luar. Pada selubung inti terdapat banyak pori (diameternya 300-500 Angstrom, dengan jarak 0,1-0,2 mikron) ; melalui pori ini, lapis luar dan lapis dalam berhubungan.

Pada lapis luar terdapat ribosom yang berhubungan dengan selaput rER, dan sER. RNA yang dibuat di dalam inti akan keluar melalui pori-pori selaput inti, lalu masuk sitoplasma, kemudian bergabung dengan retikulum endoplasma.

Nukleoplasma. Nukleoplasma atau karyolymphe terdiri atas cairan dan benda yang larut di dalamnya, misalnya protein dasar, DNA, RNA, lipida, garam anorganik. Di sini juga terdapat kromatin.

Nukleolus. Nukleolus atau plasmolema berbentuk bulat, terdapat di dalam inti. Mengandung unit ribosom (rRNA) yang akan dilepas ke dalam sitoplasma. Pada fase profase, nukleolus hilang, dan muncul lagi pada telofase.

Kerangka sel

Agar sel-sel dapat membentuk struktur tertentu, terdapat sistem kerangka sel atau cytoskeleton yang terdiri atas filamen mikro, filamen miosin, filamen intermedia, pembuluh mikro, protein. Kerangka sel mempertahankan bentuk sel, stabilitas sel, dan gerak sel.

Filamen mikro. Panjangnya 1,0 mikro mili, dengan diameter 5-8 nm. Terbentuk dari protein aktin, protein troponin, dan protein tropomiosin. Merupakan komponen utama sel otot, mikrovili, dan stereosilia. Pada sel yang dapat berpindah tempat, misalnya sel-sel makrofag, filamen aktin berperan aktif dalam gerakan sel. Filamen ini tersebar dalam sitoplasma, utamanya di dekat membran plasma.

Filamen miosin. Filamen miosin berbentuk filamen tebal (panjang 1,5 mikromili diameter 15 nm), hanya terdapat pada sel otot. Hampir semua sel mamalia mengandung miosin di dalam filamen mikronya. Interaksi antara miosin dengan filamen aktin dalam sitoplasma penting bagi perubahan bentuk sel dan gerak sel (pada pembelahan sel).

Filamen intermedia. Diameternya 8 - 10 nm. Terdapat sebagai neurofilamen pada neuron, filamen glia dalam atrosit, dan pada filamen keratin dalam sel-sel epitel. Fungsi filamen intermedia adalah mempertahankan bentuk sel, dan sebagai pertautan antar sel pada sel epitel.

Pembuluh mikro. Pembuluh ini tersusun dari globular tubulin polipeptida yang membentuk protofilamen, yang terdapat pada sitoplasma. Panjangnya bervariasi, diameternya 25 nm. Bersifat stabil, utamanya terdapat pada silia, flagela, sentriol, dan badan basal. Fungsi pembuluh ini adalah

1. Membantu pembelahan sel dengan cara polimerisasi pembuluh mikro ini. Beberapa bahan kimia (colchicine dan vincristine) dapat menyumbat pembuluh mikro sehingga menghambat proses pembelahan sel.
2. Membantu pembentukan kerangka sel, mempengaruhi penyebaran elemen mikro dan filamen intermedia dan polaritasnya, mempengaruhi pertumbuhan penjurusan sel syaraf, dan mempengaruhi transpor berbagai organel dari perikarion ke tepi.

Modifikasi permukaan

Sering terjadi perubahan keadaan membran plasma (pada permukaan lumen, daerah basal, dan daerah lateral) dan lokasi organel sehingga terjadi perubahan polarisasi sel epitel.

Membran permukaan lumen. Protein yang terdapat pada membran sel epitel pada sisi permukaan lumen, umumnya berbeda dengan yang di sisi lateral dan membran basal.

CONTOH: membran permukaan tubuli renalis ginjal mengandung fosfatase basa, sedang pada sel epitel usus mengandung enzim untuk menghidrolisis gula.

Membran basal. Membran plasma basal (basal cell membrane) pada beberapa macam sel epitel mengandung Na K ATP-ase (enzim hidrolitik yang berperan dalam transfer Na dan K). Permukaan basal epitel kelenjar endokrin mengandung reseptor hormon.

Glikokaliks. Glikokaliks melindungi permukaan epitel utamanya pada mikrovili. Bahan ini mengandung banyak karbohidrat dan sistem enzim sehingga proses penyerapan menjadi lebih mudah.

Pertautan antar sel

Jarak membran plasma pada sel-sel epitel kira-kira 20 nm. Karena itu, sel-sel epitel ini harus saling berhubungan, sehingga strukturnya tetap kuat dan memungkinkan terjadinya komunikasi. Agar struktur sel-sel itu kuat (tidak mudah berubah posisinya), diperlukan hubungan penguat, sedang agar ada komunikasi antar sel diperlukan hubungan komunikasi.

Hubungan penguat. Ada tiga macam hubungan penguat (adhering junction) yang dilakukan oleh desmosom, yaitu desmosom bintik, desmosom lajur, dan hemidesmosom.

Desmosom bintik (macula adherens, spot desmosome), berbentuk cakram, diameternya 200-400 nm, terdapat pada membran plasma utamanya pada sel epitel pipih banyak lapis, yaitu pada lapisan stratum spinosum, sehingga menautkan sel epitel yang satu dengan sel epitel disebelahnya. Selain itu, pada epitel pipih banyak lapis ini, pada stratum basale juga terdapat hemidesmosom yang menghubungkan sel epitel itu dengan jaringan di bawahnya.

Ruang antar sel pada epitel pipih banyak lapis ini, berisi filamen yang menghubungkan membran plasma sel yang satu dengan membran plasma sel yang lain melalui desmosom. Filamen ini juga tersebar di dalam sel sehingga menjadi kerangka sel.

Desmosom lajur (zonula adherens, belt desmosomes, terminal bar), terdapat pada sel-sel epitel lajur. Filamen di antara sel epitel lajur berhubungan dengan membran plasma (permukaan sitoplasma) dan terminal web.

Hubungan impermeabel. Fungsi hubungan impermeabel (impermeable junction) ini adalah untuk menahan agar bahan tertentu saja di dalam isi lumen yang dapat masuk ke dalam ruang antar sel (permeabel selektif). Sifat permeabilitas ini menyebabkan sel dapat mempertahankan polaritasnya. Hubungan impermeabel pada mamalia termasuk dalam hubungan ketat (tight junction, zonula occludens).

Hubungan celah. Pada beberapa bagian epitel terdapat bagian yang jarak antar selnya hanya 2 nm. Celah ini dihubungkan oleh enam selaput protein, yang merupakan hubungan celah (gap junction). Fungsi utamanya adalah sebagai tempat transfer ion dan molekul kecil, karena ion serta molekul yang kecil dapat lewat dari satu sel ke sel yang lain, sehingga dapat terjadi aliran impuls listrik.

Hubungan celah terdapat pada sel-sel jaringan tubuh, kecuali otot kerangka dan benda-benda darah.

Hubungan antar sel epitel usus dilakukan oleh zonula occludens, zonula adherens, dan macula adherens. Ketiga hubungan itu disebut junctional complex.

Penunjang sel

Tonofilamen. Tonofilamen berfungsi untuk menunjang struktur sel, dan mempertautkan sel yang satu dengan sel yang lain. Tonofilamen terdiri atas tonofibril. Selanjutnya, di dalam sel tonofilamen membentuk jalinan yang disebut sarang sel atau cytoplasmic network atau cell web.

Tonofilamen tersebar di seluruh bagian sel, utamanya pada daerah pertautan antar sel. Pada sel epitel silinder, tonofilamen terpusat di daerah puncak (kutub, apex), yang disebut terminal web. Dari terminal web, tonofilamen memanjang masuk ke dalam mikrovili untuk menunjang struktur mikrovili.

Penjuluran permukaan sel

Silia dan flagela. Ada beberapa macam sel epitel yang pada permukaannya terdapat ratusan silia. Fungsi silia dan flagela adalah untuk menggerakkan suatu benda ke arah luar.

Diameter silia kira-kira 0,2 mikrometer, panjangnya 5 - 15 mikrometer. Di dalam setiap silia terdapat dua pembuluh besar di tengah yang bercabang-cabang menjadi pembuluh yang lebih kecil. Pembuluh ini memanjang dari puncak sampai dasar silia.

Silia menjadi ketat (kaku) pada saat berfungsi (misalnya membuang lendir) dan menjadi luwes pada saat relaksasi. Silia ini bekerja dengan irama yang ritmik (berurutan). Selama gerakan silia, pasangan pembuluh mempergunakan energi hasil reaksi ATP menjadi ADP.

Flagela adalah silia tunggal yang panjang.

CONTOH: silia terdapat pada sistem pernafasan (mengalirkan lendir), sistem genitalis jantan dan betina (mengalirkan spermatozoa dan oosit). Flagela terdapat pada spermatozoa, (beberapa ratus mikrometer), dengan gerakan undulasi untuk maju.

Mikrovilus. Mikrovili terdapat pada epitel yang melakukan penyerapan (absorpsi), mengsekresi enzim disakaridase. Diameternya 0,1 mikro meter, panjangnya bervariasi, berbentuk silinder. Di tengah-tengah vili, mulai puncak sampai terminal web di dasar vili, terdapat filamen aktin.

Gerakannya berupa penjuluran sitoplasma yang terdapat pada permukaan sel epitel.

CONTOH: Pada striated border usus halus dan brush border tubulu convoluti ginjal, dan sel-sel lain yang mempunyai fungsi menyerap (mesotel pleura dan peritoneum).

Stereosilia. Mikrovilinya kaku, ditengahnya terdapat filamen aktin, dan mampu mendeteksi adanya aliran cairan.

CONTOH: sel-sel reseptor pada alat pendengaran, epitel saluran epididimis.

Sifat kimiawi sel

Protoplasma adalah keseluruhan bahan sel hidup, sedang nukleoplasma adalah protoplasma yang ada di dalam nukleus, dan sitoplasma adalah protoplasma di luar nukleus. Untuk lebih memahami fungsi sel, perlu diketahui bahan penyusun sel serta sifat-sifatnya.

Senyawa organik yang ada di dalam protoplasma adalah seperti Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Senyawa organik dalam protoplasma sel hewan

| Bahan | Bobot (%) | Bahan | Bobot (%) |
|-------------|-----------|-----------------|-----------|
| Protein | 15,0 | lemak | 3,0 |
| Karbohidrat | 1,0 | Garam anorganis | 1,0 |
| Air | 80,0 | | |

Selain senyawa organik, di dalam protoplasma sel hewan juga terdapat berbagai unsur kimia (Tabel 3). Tampak, bahwa unsur oksigen, karbon, dan hidrogen relatif paling banyak jumlahnya daripada unsur yang lain. Selain unsur-unsur yang tercantum dalam Tabel 3 ini, juga terdapat cuprum, cobalt, mangan, zinkum dan sebagainya. Tabel 4 menyajikan daftar ion yang terdapat di dalam protoplasma.

Tabel 3. Unsur kimia pada protoplasma sel hewan

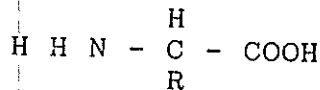
| Unsur | Bobot (%) | Unsur | Bobot (%) |
|-----------|-----------|----------|-----------|
| Oksigen | 76,0 | Karbon | 10,5 |
| Hidrogen | 10,0 | Nitrogen | 2,5 |
| Fosfor | 0,3 | Potasium | 0,3 |
| Sulfur | 0,2 | Klor | 0,1 |
| Natrium | 0,04 | Kalsium | 0,02 |
| Magnesium | 0,02 | Ferum | 0,01 |

Garam anorganis dalam protoplasma biasanya terdapat dalam bentuk ion, sedang senyawa anorganik terdapat dalam bentuk elektrolit, dan senyawa organik dalam bentuk nonelektrolit. Elektrolit yang larut dalam air akan mengalami ionisasi menjadi ion.

Tabel 4. Ion-ion dalam protoplasma

| Kation | | Anion | |
|-----------|-------------------|-----------------|---------------------------------|
| Natrium | Na ⁺ | Klor | Cl ⁻ |
| Kalium | K ⁺ | Bikarbonat | HCO ₃ ⁻ |
| Kalsium | Ca ⁺⁺ | Karbonat | CO ₃ ^{- -} |
| Magnesium | Mg ⁺⁺ | Hidrogen fosfat | HPO ₄ ^{- -} |
| Ferum | Fe ⁺⁺⁺ | Fosfat | PO ₄ ⁻ |

Protein. Terdiri atas rangkaian asam amino, dengan rumus bangun umum:



NH₂ merupakan gugus amino, sedang COOH merupakan gugus karboksil, dan R adalah berbagai ragam jenis senyawa kimia. Molekul asam amino dapat bersifat asam karena ada gugus karboksil, dan dapat juga bersifat basa karena ada gugus amino. Karena itu, molekul-molekul asam amino dapat saling berikatan membentuk molekul yang lebih kompleks dan besar.

Jika asam amino dilarutkan dalam air, maka ion hidrogen akan lepas dari gugus karboksil, sehingga menjadi bermuatan negatif. Selanjutnya, ion hidrogen lalu akan berikatan dengan gugus amino sehingga menjadi bermuatan positif. Hal ini dapat menimbulkan polaritas pada molekul asam amino. Selain itu, kutub positif suatu asam amino dapat berikatan dengan kutub negatif asam amino yang lain. Akibatnya terbentuk molekul baru setelah melepaskan satu molekul air pada tempat pertemuan. Molekul baru ini disebut rantai peptida.

Senyawa yang terbentuk dari gabungan dua asam amino disebut dipeptida; molekul dipeptida ini mempunyai satu gugus COOH dan satu gugus NH₂ (seperti asam amino yang asli). Gabungan semacam ini dapat membentuk tripeptida, dan polipeptida. Sejumlah polipeptida dapat membentuk pepton, proteose, dan protein.

Protein terbagi atas:

1. Protein sederhana (simple protein, basic protein), antara lain:

a. Albumin yang larut dalam air, mengendap dalam larutan amonium sulfat jenuh.

CONTOH: Terdapat pada putih telur

b. Globulin. Tidak larut dalam air, tetapi larut dalam larutan NaCl.

CONTOH: Alfa, beta, gama globulin yang terdapat dalam plasma atau serum darah.

c. Glutelin. Tidak larut dalam air, larut dalam asam atau basa lemah. Pada suhu tinggi akan menggumpal.

CONTOH: Ada pada biji-bijian.

d. Histon. Larut dalam air.

CONTOH: globin pada hemoglobin termasuk histon.

e. Keratin. Sukar larut, banyak mengandung asam amino sistein.

CONTOH: ada pada kuku, dan rambut.

2. Proteida, yaitu protein dasar yang terikat dengan bahan-bahan lain. Terbagi atas:

2.1. Nukleo-protein, yaitu protein yang terdapat pada inti sel, terdiri atas protein dasar (misalnya protamin atau histon) dan asam nukleat. Asam nukleat adalah polimer nukleotida; pada setiap nukleotida terdapat pentosa dan asam fosfat serta pirimidin dan purin.

Berdasar tipe pentosa-nya, ada dua macam nukleotida, yaitu deoxyribonucleic acid (DNA), dan ribonucleic acid (RNA).

DNA terdapat pada kromosom (pada nukleus). Kadar DNA dalam inti relatif tetap, kecuali pada sel haploid (pada spermatozoa dan ovum) atau poliploid (pada sel hati atau osteoklast). Kadar DNA tinggi menjelang mitosis dan pada sel yang metabolismenya aktif (sel hati, ginjal).

RNA terdapat di dalam nukleus, utamanya di nukleolus, dan sitoplasma yang selnya aktif menghasilkan enzim, sel syaraf (bahan tigroid), sel yang regenerasi, mioblast dan sebagainya.

2.2. Khromo-protein.

CONTOH: Ada pada hemoglobin.

2.3. Glisi-protein. Protein ini terikat dengan karbohidrat.

CONTOH: pada lendir

2.4. Fosfo-protein. Berikatan dengan asam fosfor.

CONTOH: kasein (protein susu), vitelin (protein kuning telur).

2.5. Lipo-protein. Protein ini terikat dengan lemak.

Karbohidrat. Terbagi atas poliosa, biosa, dan monosa.

1. Poliosa (polisakarida).

CONTOH: glikogen pada hati, serta amilum dan selulosa pada tanaman.

2. Biosa.

CONTOH: laktosa (dalam susu), sakarosa (dalam gula tebu), maltosa (amilum yang dihidrolisis)

3. Monosa.

CONTOH: glukosa, galaktosa, dan pentosa.

Lemak. Bersifat tidak larut dalam air, tetapi larut dalam xilol, alkohol, eter, benzol, kloroform. Terbagi atas:

1. Lemak dasar

CONTOH: trigliserida.

2. Malam

CONTOH: malam lebah

3. Minyak terbang

CONTOH: terpentin

4. Fosfatida, yang terdiri atas gabungan asam lemak, alkohol, amino, dan asam fosfor. Dapat dibagi atas lesitin, kefalin, serebrosida, dan sterol.

Lesitin terdapat pada kuning telur, dan jaringan syaraf. Lesitin jika terkeha bisa ular akan menjadi lisolesitin yang mampu menyebabkan hemolisis eritrosit darah.

Kefalin terdapat pada kuning telur, jaringan syaraf, berfungsi mempercepat pembekuan darah.

Serebrosida atau glikolipid, yang berikatan dengan galaktosa.

Sterol terdapat pada eritrosit yang dapat menghambat hemolisis, jika terlalu banyak menimbulkan arteriosklerosis.

Garam anorganik. Terdiri atas K, Na, Ca, Mg, Fe, S, P, Cl serta "trace elements", yaitu B, Br, Cu, F, Mn, Me, Zn, Co.

Bahan lain. Bahan lain dalam sel adalah enzim, yang terdapat dalam sitoplasma, dan merupakan biokatalisator untuk oksidasi, reduksi, hidrolisis, atau fosforilasi. Enzim yang penting dalam kimia sel adalah fosfatase basa, sitokrom oksidase, kholinesterase, dan suksinat dehidrogenase.

Fosfatase basa terdapat dalam brush border tubulus contortus primus ginjal, pada striated border usus, inti endotel. Berfungsi untuk menghidrolisis karbohidrat.

Sitokrom oksidase merangsang sekresi sitokrom C dalam reaksi oksidase dalam metabolisme.

Kholinesterase terdapat di jaringan tubuh menghidrolisis asetilkholin menjadi kholin dan asam asetat.

Suksinat dehidrogenase memobilisasi hidrogen dari bahan jaringan agar dapat ditangkap oleh aseptor. Merupakan biokatalisator asam suksinat menjadi asam fumarat.

Sifat fisik protoplasma

Di dalam sel, pada tingkat molekuler terdapat suatu organisasi struktural yang ditimbulkan oleh unsur-unsur yang ada di dalamnya. Protoplasma merupakan sistem larutan dan sistem koloid.

Molekul selalu bergerak secara konstan dalam ruang intermolekulernya, karena adanya energi kinetik. Kecepatan gerak molekul ini bervariasi, diduga 2 miliar kali diameter molekul itu setiap detik (dalam bentuk gas, kira-kira 20 mil per menit). Karena gerakan konstan itu, maka terjadi benturan antar molekul.

Kecepatan gerak molekul dapat ditambah (misalnya dipanasi), yang menyebabkan jarak antar molekul menjadi bertambah jauh.

Fase suatu benda dapat dalam bentuk gas, cair, atau padat. Selain itu, dapat pula menjadi larutan, koloid atau suspensi.

Di dalam larutan, molekul bahan terlarut terpisah satu sama lain dan dapat bebas bergerak di antara molekul pelarut. Hal ini terjadi, misalnya, pada campuran gula dengan pelarut air. Jika pasir dicampurkan dengan air, maka untuk sementara partikel pasir akan berada dalam bentuk suspensi yang labil; nantinya partikel pasir akan mengendap.

Jika tanah liat yang sangat halus dicampurkan dengan air, maka sebagian akan mengendap dan sebagian lagi akan menjadi suspensi yang stabil, kecuali jika ada faktor yang mengendapkannya. Suspensi stabil ini disebut koloid. Koloid dapat terdiri atas campuran bahan padat dengan cair, atau cair dengan cair. Jika air dicampur dengan minyak (cair dengan cair) dan diaduk, maka juga terbentuk suspensi yang naik ke permukaan. Suspensi ini disebut emulsi.

Emulsi dapat stabil (misalnya campuran susu yang stabil; molekul lemak amat kecil), sehingga menjadi emulsi stabil yang tidak muncul ke permukaan).

Perbedaan antara larutan dengan koloid dan emulsi terletak pada ukuran partikel dan muatan listriknya. Lihat Tabel 5.

Tabel 5. Skema sifat kelarutan dan ukuran partikel larutan, koloid, dan suspensi

| | Larutan | Koloid | Suspensi |
|-------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|
| 1. Kelarutan partikel (molekul/ion) | Tersebar merata di antara molekul pelarut | Tersebar merata; tidak akan mengendap | Tersebar; mengendap jika |
| 2. Ukuran partikel (mikron) | < 0,001 | 0,1 - 0,001 | > 0,1 . |

Pada larutan, ada gerakan partikel bahan terlarut dan partikel ini tidak akan mengendap karena gaya tarik bumi tidak cukup kuat untuk mengendapkannya.

Pada koloid, selain karena ada gerakan partikel dan kurang kuatnya gaya tarik bumi, juga partikel koloid didorong ke segala arah oleh partikel pelarutnya. Selain itu, partikel koloid mempunyai muatan listrik yang sama sehingga saling menolak dan tersebar. Penambahan bahan kimia tertentu dapat menyebabkan hilang atau berubahnya muatan listrik, sehingga partikel tersebut mengendap. Jika ditempatkan elektroda, maka partikel koloid akan menuju katoda atau anoda, tergantung jenis koloidnya.

Pada sistem koloid, jika partikel koloid tersebar lebih merata di dalam cairan, maka koloid itu berada dalam keadaan sol yang relatif lebih encer. Jika partikel koloid membentuk anyaman, dan air terletak di antara anyaman tersebut, maka koloid itu berada dalam keadaan gel yang lebih pekat.

Karena partikel koloid amat halus dan banyak, maka permukaan partikel koloid relatif amat luas, sehingga memungkinkan terjadinya banyak reaksi kimia dan menarik molekul, atom, atau ion. Tarikan molekul, atom, atau ion ini disebut proses adsorpsi. Kemampuan melakukan adsorpsi koloid menyebabkan koloid dapat berubah menjadi lebih pekat atau padat (agar-agar).

Sistem koloid amat penting dalam kehidupan protoplasma karena:

1. Permukaan molekul relatif amat luas, sehingga memungkinkan terjadinya sejumlah besar reaksi kimia,
2. Tidak dapat menembus membran sehingga stabilitas dalam protoplasma terjamin,
3. Dapat berubah fasenya, sehingga protoplasma dapat berubah fungsi,
4. Mampu mengubah fase struktur koloid membran plasma, sehingga terjadi perubahan permeabilitas dan arus bahan-bahan masuk dan ke luar sel,
5. Mampu berubah menjadi sol atau gel (dan sebaliknya), sehingga protoplasma dapat mengembang atau mengkerut, yang berguna dalam gerakan sel (pada amuba).

Jika dua macam fase zat dicampurkan, maka molekul kedua macam zat itu akan cenderung bercampur melalui proses difusi. Jika di antara kedua bahan yang dicampurkan itu diberi suatu membran, maka membran itu dapat dilalui oleh molekul bahan tersebut. Ini disebut permeabilitas.

Permeabilitas suatu membran tergantung pada:

1. Ukuran pori pada membran,
2. Ukuran partikel dalam bahan,
3. Keadaan larutan bahan tersebut.

Oleh karena itu, suatu membran dapat permeabel terhadap ion tetapi impermeabel terhadap molekul yang kecil atau permeabel terhadap suatu molekul yang kecil tetapi impermeabel terhadap molekul yang besar. Lewatnya air melalui suatu membran semipermeabel disebut osmosis.

Membran plasma sel, misalnya, bersifat permeabel selektif. Molekul yang kecil atau ion dapat lewat, tetapi molekul yang besar (protein dan partikel koloid lain) tidak dapat lewat. Molekul yang bergerak dalam suatu larutan memberikan suatu tekanan pada membran di sekelilingnya, yang disebut tekanan osmotik. Tekanan osmotik di dalam sel cukup besar, sehingga membran plasma sel tetap terregang.

Berdasar perbandingan konsentrasinya, dua larutan dapat isotonik, hipertonic, atau hipotonik. Jika dua larutan berada dalam suatu tempat dan di antara kedua larutan dipisahkan oleh suatu membran, maka air dari larutan yang hipotonik akan mengalir ke arah larutan yang hipertonic. Sel yang ditempatkan di dalam larutan hipertonic akan menyebabkan air dalam sel mengalir ke luar, sehingga dinding sel akan berkerut, yang disebut plasmolisis.

Sebaliknya, jika sel ditempatkan di dalam larutan yang hipotonik, maka air dari larutan akan memasuki sel sehingga sel mengembang, yang disebut turgor. Jika turgor berlangsung intensif, sel dapat pecah.

Dengan demikian, maka konsentrasi larutan di luar sel akan menentukan gerakan bahan keluar dari atau masuk ke sel. Proses ini yang menyebabkan sel mendapat nutrisi atau membuang sisa hasil metabolisme.

Protoplasma lebih tinggi viskositasnya (lebih tinggi konsentrasinya) daripada air atau larutan yang pelarutnya adalah air. Di dalam sel, viskositas setiap bagian protoplasma juga tidak sama; ada bagian protoplasma yang lebih encer daripada bagian yang lain, tetapi pada saat yang lain bagian itu barangkali sudah berubah menjadi lebih pekat. Viskositas dipengaruhi oleh derajat keasaman dan suhu.

Bioelektrik

Seperti diketahui, protoplasma mengandung banyak elektrolit. Hasil proses disosiasi asam, basa, dan garam menghasilkan ion yang dapat menimbulkan muatan listrik pada permukaan di mana terjadi akumulasi ion.

Jika koloid asam dipisahkan dari koloid basa dengan mempergunakan membran semipermeabel dielektrik (nonkonduktif), maka akan timbul perbedaan energi potensial listrik. Hal ini terjadi, misalnya, antara nukleus (asam, bermuatan positif) dengan sitoplasma (basa, bermuatan negatif). Lapisan tipis lemak di sekitar nukleus akan menahan aliran ion-ion H^+ . Keseimbangan asam basa (atau perbedaan potensial listrik) antara nukleus dengan sitoplasma ini penting untuk menjamin kehidupan.

Latihan

1. a. Sebutkan fungsi umum sel.
b. Apakah setiap sel melaksanakan setiap fungsi umum tersebut ?
2. a. Sebutkan bagian-bagian suatu sel.
b. Apakah setiap sel mempunyai semua bagian sel tersebut ?
c. Jelaskan struktur, letak, dan fungsi setiap bagian sel.
3. a. Apa bagian dan fungsi kerangka sel ?
b. Jelaskan struktur setiap bagian kerangka sel.
4. a. Apa fungsi modifikasi permukaan sel ?
b. Jelaskan bentuk modifikasi permukaan sel.
5. a. Apa fungsi pertautan antar sel ?
b. Jelaskan macam pertautan antar sel.
6. a. Sebutkan unsur (senyawa organik dan anorganis) yang ada di dalam sel.
b. Jelaskan macam senyawa organik yang ada dalam sel.
7. a. Jelaskan struktur dan sifat: larutan, koloid, dan suspensi.
b. Jelaskan peranan koloid dalam kehidupan protoplasma sel.
8. a. Jelaskan pengertian permeabilitas, semipermeabel, dan permeabel.
b. Jelaskan pengertian turgor, plasmolisis, dan bioelektrik.

2. ENZIM

Di dalam sel yang hidup, dihasilkan ribuan jenis enzim yang berfungsi untuk mengatur berbagai perubahan kimiawi yang berlangsung di dalamnya. Enzim ini diproduksi pada tempat, jumlah, dan waktu yang tepat, dengan penggunaan energi yang amat minimum. Sudah banyak macam enzim yang berhasil diekstraksi dan dapat dimurnikan. Dari lebih 1.000 macam enzim, lebih dari 150 telah dapat dibuat kristalnya.

Sel organisme yang berbeda dapat menghasilkan beberapa enzim yang identik (mirip) atau mempunyai fungsi yang serupa. Misalnya, banyak reaksi enzim yang terjadi di dalam sel khamir ternyata serupa dengan yang terjadi di dalam sel otot.

Enzim merupakan katalisator, yang dalam jumlah amat sedikit saja sudah dapat mempercepat reaksi kimia tanpa enzim itu sendiri berubah setelah reaksi selesai. Satu molekul enzim dapat mengkatalisis 10 sampai 1.000 molekul substrat per detik. Menurut perhitungan, penguraian protein dalam proses pencernaan manusia akan memakan waktu lebih dari 50 tahun tanpa bantuan enzim. Karena merupakan katalisator, maka enzim bersifat spesifik. Artinya, hanya berfungsi pada suatu macam reaksi tertentu atau terhadap satu macam substrat saja.

Tatanama

Bagi setiap enzim ada dua macam nama, yaitu nama biasa atau nama kerja dan nama sistematik. Nama biasa lebih pendek dan lebih mudah digunakan. Nama resmi atau nama sistematik dibentuk menurut aturan-aturan yang pasti, dan memberikan petunjuk mengenai macam substrat dan macam reaksi yang dikatalisisnya. Misalnya, heksokinase adalah nama biasa dari ATP; sedang heksose fosfotransferase adalah enzim yang menambahkan sebuah gugusan fosfat pada glukose.

Tabel 6. Klasifikasi enzim dan reaksi katalitiknya

| Kelas | Reaksi Katalitik |
|-----------------|--|
| Oksidoreduktase | Reaksi transfer elektron (pemindahan elektron atau atom hidrogen). |
| Transferase | Transfer gugus fungsional (misalnya gugus fosfat, amino, metil dan sebagainya). |
| Hidrolase | Reaksi hidrolisis (penambahan molekul air untuk memecahkan ikatan kimia) |
| Liase | Penambahan ikatan ganda pada molekul dan juga pengusiran nonhidrolitik gugus-gugus kimia. |
| Isomerase | Reaksi isomerisasi (pengubahan suatu senyawa menjadi isomer, misalnya suatu senyawa yang memiliki atom-atom yang sama tetapi berbeda struktur molekulnya). |
| Ligase | Pembentukan ikatan disertai pemecahan atau penambahan ATP (adenosin trifosfat) |

Tipe reaksi kimia katalisis merupakan dasar pembuatan klasifikasi dan penamaan enzim. Nama enzim mempergunakan akhiran -ase. Klasifikasi dan penamaan hanya diberikan bagi enzim-enzim tunggal dan bukan bagi sistem enzim. Enzim tunggal, misalnya, suksinat dehidrogenase.

Nama suatu kompleks enzim (yang terdiri dari beberapa enzim), dilakukan berdasarkan keseluruhan reaksi (katalisis) yang terjadi. Di sini digunakan kata sistem, misalnya, sistem suksinat oksidase, yang merupakan oksidasi untuk mengkatalisis asam suksinat oleh oksigen yang berlangsung beberapa tahap oleh beberapa macam enzim. Pada Tabel 1 disajikan beberapa kelas enzim dan reaksi katalitik yang dilakukannya.

Sintesis enzim

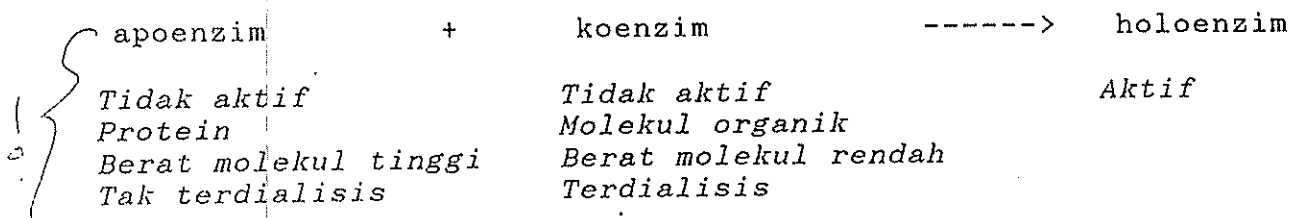
Umumnya, enzim dihasilkan (disintesis) dan bekerja di dalam sel, tetapi ada beberapa enzim yang diekskresikan ke luar melalui dinding sel dan bekerja di luar sel. Enzim ini disebut enzim ekstraselular (eksoenzim). Fungsi utama eksoenzim ialah mempercepat reaksi menguraikan (meng-katalisis) substrat (nutrien) yang ada di luar sel, sehingga memungkinkan unsur nutrien tersebut memasuki sel. Misalnya, amilase menguraikan pati menjadi unsur-unsur gula yang lebih kecil, sehingga dapat memasuki sel.

Enzim yang berfungsi di dalam sel disebut enzim intraseluler (endoenzim). Enzim intraseluler ini berfungsi mensintesis bahan penyusun sel dan menguraikan nutrien yang sudah ada di dalam sel menjadi energi yang dibutuhkan oleh sel. Misalnya, heksokinase mengkatalisis fosforilasi glukose dan heksose (senyawa-senyawa gula sederhana) di dalam sel.

Sifat Kimia dan Fisik

Enzim terdiri atas beberapa komponen, yaitu protein murni atau gabungan antara protein dengan gugus kimiawi lainnya. Protein enzim merupakan molekul yang amat besar; berat molekulnya berkisar antara kurang lebih 10.000 sampai satu juta.

Apoenzim, koenzim dan holoenzim. Umumnya, enzim terdiri atas gabungan antara protein dengan molekul organik. Bagian proteinnya disebut apoenzim, yang bersifat tidak aktif, dengan berat molekul yang tinggi, dan tidak dapat di-dialisis (tidak dapat melewati membran semipermeabel atau membran selektif), sedang molekul organiknya disebut koenzim, yang memiliki berat molekul yang rendah dan dapat di-dialisis. Bila bergabung, kedua bagian tersebut membentuk enzim yang lengkap dan aktif, yang disebut holoenzim. Lihat ilustrasi skema berikut.



Ilustrasi 1. Skema pembentukan apoenzim dan koenzim menjadi holoenzim serta sifat-sifatnya.

Sebagai contoh, apoenzim dehidrogenase mempergunakan koenzim nikotinamid-adenin dinukleotida (NAD, nicotinamide-adenine dinucleotide) atau nikotinamid-adenin dinukleotida fosfat (NADP, nicotinamide-adenine dinucleotide phosphate). NAD dan NADP ini berfungsi untuk membawa nuklei hidrogen dengan 2 elektron yang berasal dari substrat (jadi mengoksidasi substrat)

Substrat + NAD + enzim ---> substrat teroksidasi + NADH + H⁺

Pada arah sebaliknya, substrat direduksi. NADP dan NADPH bekerja dengan cara yang sama. Kedua koenzim tersebut mempunyai 1 mole adenin, 1 mole nikotinamid, 2 mole D-ribosa, dan sebaliknya 2 atau 3 mole fosfat anorganik.

Di dalam sel, proses yang menghasilkan energi (katabolik) memerlukan NAD⁺, dan sebaliknya proses yang memerlukan energi (anabolik), memerlukan NADPH. Banyak koenzim, seperti NAD⁺ dan NADPH, yang komponennya esensialnya adalah vitamin, utamanya vitamin B kompleks. Lihat Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Beberapa vitamin beserta bentuk-bentuk koenzimnya.

| Vitamin | Koenzim |
|------------------------------|----------------------------------|
| Tiamin (B ₁) | Kokarboksilase |
| Riboflavin (B ₂) | Riboflavin adenin dinukleotide |
| Niasin | Nikotinamide adenin dinukleotide |
| Piridoksin (B ₆) | Piridoksal fosfat |
| Asam folat | Asam tetrahidrofolat |

Ada juga bagian enzim yang berupa logam, misalnya besi pada enzim katalase. Banyak enzim yang membutuhkan penambahan ion-ion logam (Mg²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Zn²⁺, dan sebagainya) untuk menjadi aktif. Ion-ion ini dapat dianggap sebagai koenzim anorganik atau kofaktor.

Ada beberapa enzim yang membutuhkan kedua-duanya, baik koenzim (organik) maupun kofaktor, untuk membuat suatu enzim menjadi aktif.

Sifat fisik. Seperti halnya semua protein, enzim akan didenaturasikan oleh panas, diendapkan oleh etanol atau garam-garam anorganik berkonsentrasi tinggi (misalnya amonium sulfat), dan tidak dapat melewati membran semipermeabel atau membran selektif (tak terdialisis).

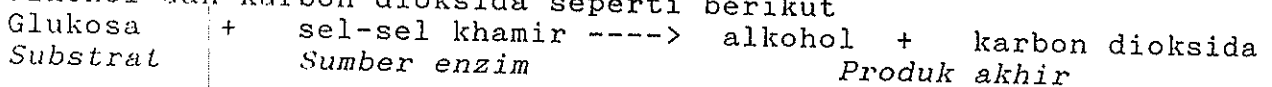
Enzim bersifat tidak stabil. Aktivitasnya dapat berkurang dengan nyata atau hancur karena berbagai kondisi fisik atau kimia. Sifat ini bervariasi di antara berbagai enzim. Beberapa enzim, misalnya, dapat menjadi tidak aktif oleh perubahan yang amat kecil di sekitarnya, misalnya bila dibiarkan sebentar saja dalam suhu kamar.

*Efisiensi dan spesifisitas. Telah diutarakan, bahwa ada dua ciri utama enzim, yaitu mengenai efisiensi katalitik dan spesifitasnya. Molekul-molekul enzim amat efisien dalam kecepatan pengubahan substrat menjadi produk akhir. Kemampuan ini, serta kenyataan bahwa enzim tidak mengalami perubahan, menyebabkan enzim dalam jumlah yang amat sedikit sudah cukup untuk melangsungkan proses-proses kimiawi di dalam sel.

Tidak seperti katalisator anorganik, aktivitas enzim bersifat spesifik; artinya setiap enzim dapat bekerja pada suatu substrat yang tertentu saja atau yang gugus kimiawinya sekerabat. Ada beberapa tingkat spesifisitas ini, yaitu yang bersifat mutlak, stereokimia, dan relatif. Spesifitas bersifat mutlak jika hanya ada satu macam substrat yang dapat dikenai (misalnya suksinat dehidrogenase), bersifat stereokimiawi, jika reaksi enzim tergantung pada konfigurasi stereokimiawi substrat, dan relatif, jika ada variasi substrat (sekerabat) yang dapat dikenai.

Sebagai contoh adalah spesifisitas enzim proteinase. Aminopeptidase dan karboksipeptidase akan bekerja (memotong) ujung grup amino dan karboksil protein. Pepsin bekerja pada bagian amino pada tirosin (atau fenilalanin); kimotripsin bekerja pada bagian karboksil, sedang tripsin bekerja pada bagian karboksil arginin dan lisin.

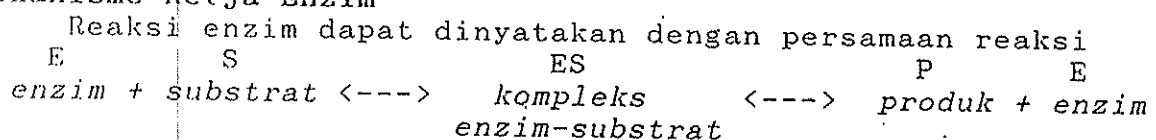
Dengan demikian, sel mampu mensintesis enzim yang berbeda untuk setiap senyawa yang akan dikenai proses metabolisme olehnya. Hasil aktivitas enzim yang pertama akan dipergunakan sebagai substrat oleh enzim yang kedua, dan seterusnya. Sebagai contoh, pada perubahan glukosa oleh sel-sel khamir menjadi alkohol dan karbon dioksida seperti berikut



Perubahan glukosa menjadi alkohol dan karbon dioksida ini disebabkan bukan hanya oleh enzim tunggal tetapi oleh sekelompok enzim (sistem enzim). Lebih dari selusin macam enzim yang bekerja berurutan, masing-masing menyebabkan terjadinya suatu reaksi kimia yang akan mengubah produk yang dibentuk oleh reaksi enzim yang sebelumnya.

Siklus Krebs pada mitokondria, terdiri atas serangkaian reaksi, yang nantinya akan berangkai (berkaitan) dengan rangkaian pernafasan (sistem transpor elektron).

Mekanisme Kerja Enzim



Enzim E dan substrat S bergabung menjadi kompleks enzim-substrat (ES), yang kemudian terurai kembali menjadi produk P dan enzim E. Jadi, enzimnya tidak terkonsumsi di dalam reaksi tetapi dilepaskan kembali untuk melakukan reaksi selanjutnya. Proses ini diulang-ulang banyak sekali sampai semua molekul substrat yang tersedia habis terpakai. Arah reaksi tergantung pada konstanta keseimbangan (ekuilibrium). Enzim akan terus merangsang proses reaksi sampai tercapai keseimbangan reaksi ireversibel.

Yang menjadi pokok perdebatan dalam teori mengenai mekanisme kerja enzim ialah konsep aktivasi substrat yang terjadi setelah pembentukan kompleks enzim-substrat (ES). Aktivasi inilah yang memungkinkan substrat diubah oleh enzim.

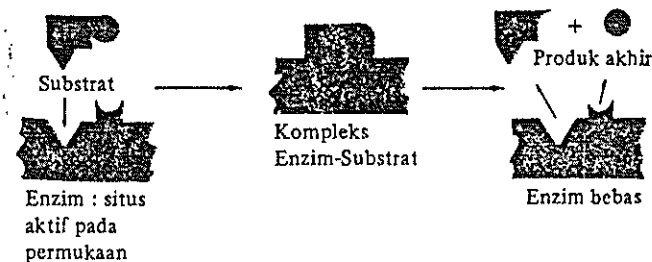
*Aktivasi molekul substrat ini disebabkan oleh tingginya afinitas kimia molekul substrat pada daerah-daerah tertentu pada permukaan protein enzim yang disebut situs aktif (active site).

Situs aktif merupakan permukaan pada bagian protein enzim, di mana enzim dapat berhubungan dengan molekul substrat.

Hampir semua enzim intraselular mempunyai lebih dari satu situs aktif per molekul. Misalnya, laktat dehidrogenase memiliki empat situs aktif. Sebaliknya, enzim ekstraselular (misalnya kimotripsin) hanya mempunyai satu situs aktif.

Keregangan (distorsi) yang terjadi pada beberapa ikatan molekul substrat membuat molekul substrat itu labil (tidak mantap). Molekul-molekul yang labil ini tidak lagi mempunyai afinitas terhadap situs aktif, sehingga lepas dari permukaan molekul enzim. Setelah lepas, enzimnya kemudian bebas lagi untuk bergabung lagi dengan molekul substrat sisanya. Proses tersebut berlangsung berulang-ulang.

Pada Ilustrasi 2 tampak skema reaksi enzim-substrat. Substrat ditarik (terikat) pada situs aktif yang ada pada permukaan molekul enzim.



Ilustrasi 2. Skema pengikatan substrat pada situs aktif permukaan molekul enzim.

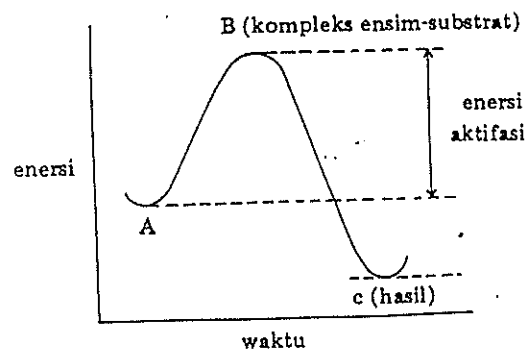
* Pada dasarnya, mekanisme kerja enzim adalah dengan cara mengurangi hambatan energi aktivasi pada suatu reaksi. Yang dimaksud dengan energi aktivasi ialah jumlah energi yang dibutuhkan bagi suatu substrat yang stabil untuk memulai suatu reaksi atau membawa substrat itu ke status reaktifnya. Enzim mampu mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi itu. Misalnya, penguraian setiap molekul H_2O_2 , jika tanpa enzim, memerlukan energi aktivasi sebesar 18000 kalori, jika dengan katalisator platina diperlukan energi aktivasi 11700 kalori, sedang dengan enzim katalase hanya memerlukan 5500 kalori. Setelah enzim bergabung dengan substratnya, akan terbentuk suatu status transisi yang membutuhkan energi aktivasi lebih kecil. Karena pada status transisi hanya diperlukan energi aktivasi yang kecil, maka ada rangsangan untuk melakukan reaksi kimia tersebut.

* Ada teori yang menyatakan, bahwa agar dapat berreaksi, molekul harus menjadi aktif terlebih dahulu (active state). Pada keadaan aktif, molekul mempunyai energi yang lebih banyak daripada jika dalam keadaan normal. Energi yang diperlukan untuk menjadi keadaan aktif inilah yang disebut energi aktivasi. Tabel berikut menunjukkan jumlah energi aktivasi beberapa reaksi.

Tabel 8. Energi aktivasi beberapa reaksi

| Reaksi | Katalisator | Energi aktivasi (kal/mol) |
|----------------------------|-----------------|---------------------------|
| Penguraian H_2O_2 | Tanpa | 18.000 |
| | Enzim platina | 11.700 |
| | Katalase | 5.500 |
| Perubahan sukrosa | H^+ | 26.000 |
| | Ragi invertase | 11.500 |
| Hidrolisis kasein | HCl | 20.600 |
| | Tripsin | 11.500 |
| Hidrolisis etil butirat | H^+ | 13.200 |
| | Lipase pankreas | 4.200 |

Pada Ilustrasi 3 diperlihatkan hubungan antara kecepatan reaksi dengan tingkat energi yang diperlukan untuk melakukan suatu reaksi. Tampak, jumlah energi yang diperlukan oleh molekul dalam keadaan normal (A), dan keadaan aktif (B). Pada keadaan aktif, terbentuk kompleks enzim-substrat. Setelah menjadi kompleks enzim-substrat, ikatan-ikatan substrat akan cenderung terurai menjadi hasil reaksi (C).



Ilustrasi 3. Hubungan antara kecepatan reaksi dengan tingkat energi yang diperlukan bagi suatu reaksi.

Kiranya jelas, bahwa fungsi utama enzim adalah untuk mengurangi energi aktivasi, yaitu energi untuk mencapai status transisi suatu reaksi kimia. Suatu reaksi yang dikatalisis terlebih dahulu oleh suatu enzim, adalah yang mempunyai energi aktivasi yang lebih rendah, sehingga memerlukan energi yang lebih sedikit agar reaksi itu berlangsung. Pada proses di atas, substrat akan terurai dan dihasilkan energi. Proses yang sama dapat juga terjadi pada proses sintesis, atau pembentukan senyawa-senyawa kompleks dari senyawa-senyawa sederhana.

Dua molekul substrat yang berbeda dapat terikat pada situs yang bersebelahan pada situs aktif enzim. Aktivasi oleh enzim akan menyebabkan ikatan antara kedua molekul substrat tersebut menjadi lebih stabil, sehingga terbentuk suatu senyawa baru yang berasal dari kedua substrat awal. Senyawa yang terbentuk ini mempunyai afinitas yang kecil terhadap situs aktif dan karenanya dilepaskan. Dengan demikian situs aktif menjadi bebas kembali sehingga proses yang sama dapat terulang dengan menggunakan dua molekul substrat yang lain.

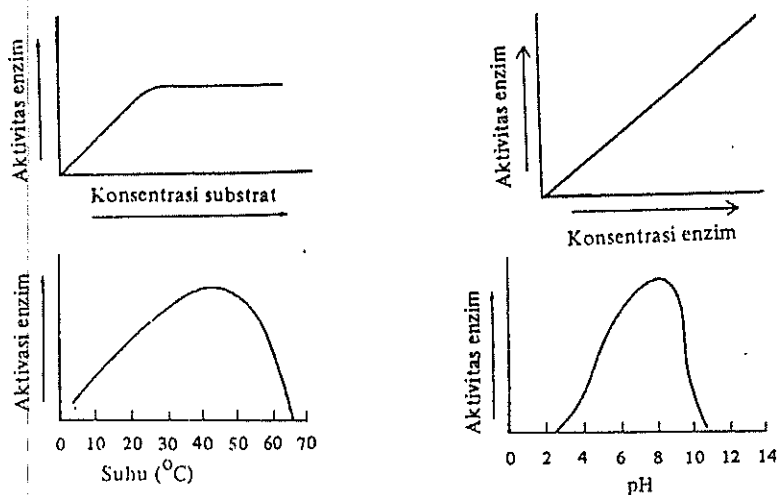
Situs aktif pada permukaan enzim sesungguhnya hanya mencakup areal amat sempit, sehingga sebagian besar permukaan molekul protein enzim (yang terdiri dari ratusan asam amino) tidak ikut berperan dalam kerja enzim. Jadi, relatif hanya sedikit saja asam amino yang langsung terlibat di dalam proses katalitik - bahkan mungkin kurang dari lima.

Perlu diketahui, bahwa "kecocokan" antara bagian permukaan enzim dan substratnya tidaklah statis; melainkan bersifat dinamis, artinya substrat dapat menimbulkan perubahan struktural pada molekul enzim.

Faktor-faktor aktivitas enzim

Ada banyak faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim. Seperti halnya semua reaksi kimia, aktivitas enzim tergantung pada luas permukaan antara molekul substrat yang berhubungan dengan molekul enzim (collisions). Karena itu, faktor-faktor yang mempengaruhi aktivitas enzim adalah faktor-faktor yang dapat meningkatkan luas permukaan hubungan, yaitu konsentrasi enzim, konsentrasi substrat, pH, dan suhu. Selain aktivitas enzim, pH dan suhu juga mempengaruhi jumlah produksi setiap enzim oleh sel.

Pada umumnya, ada hubungan antara konsentrasi enzim dengan substrat yang mempengaruhi aktivitas maksimum enzim (Ilustrasi 4). Selain itu, setiap enzim berfungsi secara optimal pada pH dan temperatur tertentu (Ilustrasi 4).



Ilustrasi 4. Pengaruh konsentrasi enzim, konsentrasi substrat, pH, dan suhu terhadap aktivitas enzim.

Penyimpangan-penyimpangan dari keadaan optimum tersebut mengakibatkan berkurangnya aktivitas enzim. Hal ini berlaku bagi semua enzim. Keragaman pH yang ekstrim atau suhu yang tinggi, dapat merusak semua enzim; pendidihan selama beberapa menit akan mendenaturasikan (menghancurkan) kebanyakan enzim. Suhu yang sangat rendah praktis menghentikan aktivitas enzim, meskipun tidak menghancurkannya. Banyak enzim dapat diawetkan dengan cara menyimpannya pada suhu sekitar 0° C atau kurang.

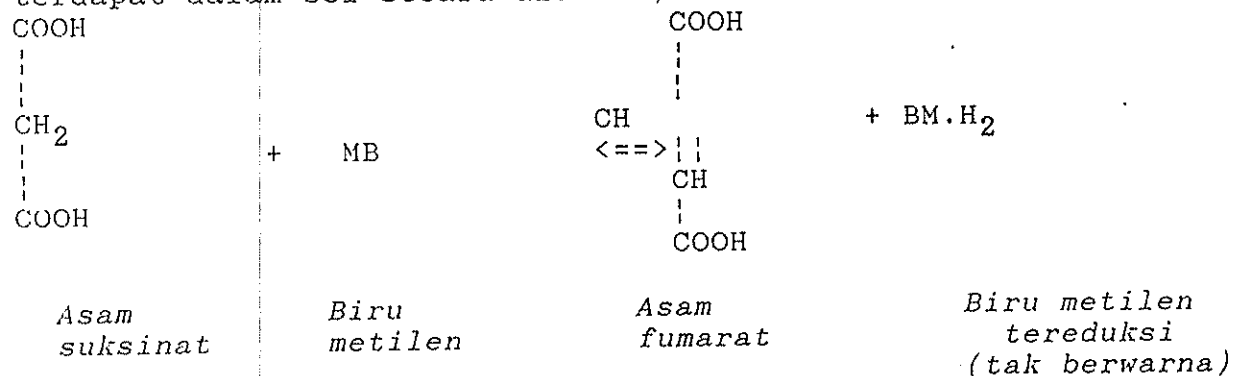
Keadaan optimum bagi aktivitas suatu enzim tidak berarti optimum bagi enzim lain atau bagi fungsinya seluruh sel.

Hambatan kerja enzim

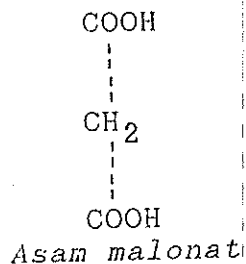
Aktivitas suatu enzim dapat dihambat (diperlambat atau bahkan dihentikan) oleh zat-zat kimia. Ada dua macam hambatan, yaitu yang nonreversibel dan reversibel. Hambatan nonreversibel (tak dapat balik) terjadi karena ada modifikasi pada satu atau lebih gugus fungsional enzim tersebut, sehingga menjadi tidak aktif.

Hambatan reversibel (dapat balik) dapat dibagi menjadi 2 tipe, yaitu kompetitif dan nonkompetitif. Hambatan kompetitif dapat dibalik dengan cara menambah konsentrasi substratnya, sedangkan yang nonkompetitif tidak dapat.

Sebagai contoh tentang hambatan kerja enzim, dapat dilihat misalnya, enzim suksinat dehidrogenase yang menyebabkan pemindahan atom-atom hidrogen dari asam suksinat ke suatu senyawa akseptor yang sesuai, yaitu biru metilen (senyawa yang tidak terdapat dalam sel secara alamiah).



Reaksi di atas dapat dihambat oleh senyawa-senyawa kimia yang mempunyai struktur yang serupa dengan asam suksinat, misalnya asam malonat.

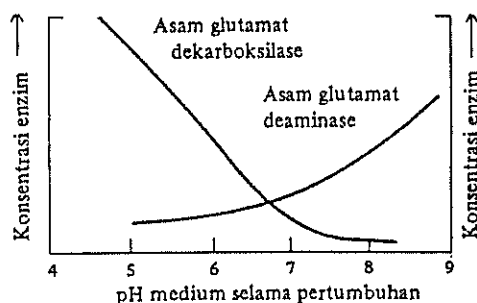


Karena strukturnya mirip asam suksinat, maka asam malonat dapat terikat pada situs aktif enzim di tempat asam suksinat umumnya terikat. Jadi, pengikatan asam suksinat dihalangi oleh asam malonat, tetapi karena asam malonat tidak diaktivasi oleh enzim tersebut, maka tidak terjadi reaksi. Dalam contoh ini terdapat kompetisi di antara kedua molekul yang berbeda itu untuk menempati situs yang sama pada enzim tersebut. Hambatan enzim semacam ini disebut hambatan kompetitif.

Zat-zat kimia tertentu mempunyai afinitas yang tinggi dengan ion-ion logam. Seperti diketahui, banyak enzim yang membutuhkan ion logam bagi aktivitasnya. Sianida adalah penghambat yang kuat bagi enzim yang mengandung besi karena dapat "mengikat" besi tersebut, jadi meniadakan komponen esensial enzim tersebut. Demikian pula, fluoride menghambat enzim yang membutuhkan kalsium atau magnesium dengan cara mengikat logam-logam tersebut. Hambatan enzim macam ini disebut nonkompetitif karena penghambatnya tidak bersaing dengan substrat untuk menempati situs aktif pada permukaan enzim.

Faktor yang mempengaruhi pembentukan enzim

Kandungan enzim sel-sel jaringan hewan relatif konstan karena berdasar sifat fisik dan kimianya, hanya mengalami sedikit perubahan. Tetapi sel-sel bakteri berada dalam suatu lingkungan yang selalu berubah. Misalnya, *Escherichia coli* dapat tumbuh dalam lingkungan yang keasamannya berragam, mulai dari yang asam atau alkali (dari pH 4.5 sampai pH 9.5), pada suhu kamar atau di atas suhu tubuh, baik secara aerobik maupun anaerobik. Sel-sel *E. coli* yang ditumbuhkan pada keadaan ekstrim ini tidak mengandung enzim yang sama, baik macamnya maupun jumlahnya (Ilustrasi 5).



Ilustrasi 5. Hubungan antara keragaman konsentrasi glutamat dekarboksilase dengan glutamat deaminasi pada *E. coli*.

Berdasarkan ada tidaknya substrat dan pembentukan enzim, maka enzim dapat dibagi dalam 2 kelompok, yaitu enzim konstitutif dan enzim adaptif. Enzim-enzim konstitutif selalu dihasilkan oleh sel, misalnya beberapa enzim pada proses glikolisis atau peruraian gula. Enzim ini selalu dijumpai dalam jumlah yang hampir sama, meskipun konsentrasi substratnya berubah.

Enzim-enzim adaptif (terinduksi) dihasilkan oleh sel karena di dalam sel tersebut ada substrat tertentu. Proses ini disebut induksi enzim, dan substratnya (atau suatu senyawa yang strukturnya menyerupai substrat) yang menyebabkan pembentukan enzim tersebut. Substrat ini disebut induser. Misalnya pada enzim galaktosidase, indusernya adalah gula laktosa.

Sifat dan mekanisme pengaturan enzim

Telah dikemukakan bahwa sebuah sel hidup mempunyai ribuan jenis enzim. Setiap enzim merupakan katalis yang efektif bagi satu atau lebih reaksi kimia, tetapi bekerja dengan serasi dengan enzim yang lain. Dengan demikian, ada mekanisme pengaturan metabolisme selular. Di dalam sel-sel jaringan organisme tingkat tinggi ada pengaturan supraselular seperti melalui syaraf dan hormon, tetapi dalam sel mikroba pengaturan lewat syaraf dan hormon tidak ada, oleh karena itu aktivitas enzim diatur melalui mekanisme katalisis secara langsung dan secara genetik.

Pengaturan katalisis dilakukan dengan pengendalian (mengurutkan) berbagai reaksi katalisis, sedang pengaturan genetik mencakup mekanisme induksi dan represi enzim. Pengaturan lewat mekanisme katalisis ini terjadi dengan mengubah konsentrasi substrat atau reaktan. Misalnya, bila konsentrasi substrat bertambah, maka laju reaksi meningkat sampai tercapai suatu nilai batas, sebaliknya, bila produk sudah menumpuk, laju reaksi menurun. Konsentrasi koenzim dan kofaktor juga mempengaruhi mekanisme pengaturan katalisis di dalam sel.

Mekanisme ini dapat juga disebabkan karena enzim dan substrat tidak dapat kontak (berhubungan) langsung. Misalnya, karena enzim terikat pada berbagai struktur internal, terutama membran dan makromolekul.

Pada beberapa mikroba, enzim proteolitik yang amat spesifik dapat menguraikan enzim-enzim lain yang tidak lagi dibutuhkan untuk reaksi-reaksi metabolik.

Latihan

1. Jelaskan dua sifat utama enzim.
2. Mengapa vitamin penting bagi aktivitas sel ?
3. Jika sel sudah mensintesis enzim dalam jumlah awal yang cukup untuk suatu reaksi tertentu, apakah sel tersebut perlu mensintesisnya lebih banyak lagi ? Jelaskan.
4. Mekanisme kerja enzim adalah dengan cara menurunkan hambatan energi aktivasi suatu reaksi kimia. Apa artinya ?
5. Apakah kondisi optimum aktivitas suatu enzim tertentu di dalam sel sama dengan di luar sel ?

3. KATABOLISME DAN ANABOLISME

Metabolisme adalah semua reaksi biokimia yang terjadi di dalam sel, baik yang membebaskan (menghasilkan) energi, maupun yang menggunakan energi. Reaksi biokimia yang membebaskan energi terjadi dengan cara menguraikan bahan kimia (misalnya nutrien) yang ada di dalam sel. Proses ini disebut disimilasi, penguraian, pernafasan (oksidasi) atau katabolik, sedang reaksi kimia yang mempergunakan energi untuk mensintesis disebut asimilasi atau anabolik. Jadi, reaksi disimilasi menghasilkan energi, dan reaksi asimilasi mempergunakan energi. Jadi, setelah proses metabolisme, ikatan-ikatan kimia tertentu diuraikan, dan akan diperoleh energi yang tersedia untuk melangsungkan berbagai kerja biologis.

Mikroorganisme heterotrofik nonfotosintetik memperoleh energinya dari oksidasi (penglepasan elektron atau atom hidrogen) senyawa-senyawa anorganik, sedang mikroorganisme fotosintetik memperoleh energinya dari cahaya.

Penggandengan reaksi-reaksi kimia di dalam sel

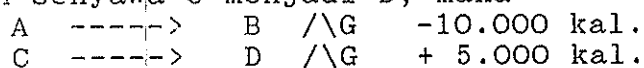
Telah diutarakan, bahwa selama berlangsungnya metabolisme, akan terjadi pembebasan (penglepasan) atau penggunaan energi. Jumlah energi yang dibebaskan atau digunakan selama berlangsungnya suatu reaksi disebut perubahan energi-bebas reaksi tersebut, yang dinyatakan dengan simbol ΔG . Tanda Δ berarti "perubahan pada" dan G berarti energi-bebas. Perubahan energi-bebas ini dapat didefinisikan sebagai "jumlah energi yang tersedia yang dilepaskan atau dipakai dalam suatu reaksi".

Lazimnya, ΔG dinyatakan dalam kalori. Sebenarnya, satuan ini tidak tepat karena energi-bebas tidak selalu berupa panas, tetapi dapat juga dalam bentuk energi kimia. Bila ΔG suatu reaksi kimia bernilai negatif, misalnya -8.000 kalori, maka reaksi tersebut membebaskan energi. Reaksi semacam ini disebut reaksi eksergonik. Bila ΔG suatu reaksi bernilai positif, misalnya +3.000 kal, maka reaksi tersebut membutuhkan energi. Reaksi ini disebut reaksi endergonik.

Di dalam sel terdapat banyak reaksi kimia endergonik yang berlangsung selama metabolisme. Reaksi-reaksi endergonik ini tidak berlangsung secara spontan, karena reaksi ini memerlukan energi yang berasal dari reaksi-reaksi eksergonik. Dengan demikian diperlukan rangkaian reaksi-reaksi yang tergandeng antara reaksi eksergonik dengan reaksi endergonik.

Organisme hidup telah mengembangkan suatu cara untuk menggandengkan reaksi eksergonik dengan reaksi endergonik untuk menyediakan energi guna mendorong berlangsungnya reaksi endergonik dengan menggunakan reaktan bersama.

Andaikan ada dua reaksi umum yang mengubah senyawa A menjadi B dan senyawa C menjadi D, maka



Reaksi yang pertama ($A \text{ --->} B$) adalah eksergonik karena ΔG nya negatif. Energi yang dilepaskan dari reaksi ini dipergunakan untuk mendorong reaksi kedua ($C \text{ --->} D$), yang bersifat endergonik. Hal ini diperoleh dengan menggandengkan kedua reaksi tersebut menjadi sebagai berikut

$A + Y_1 \rightarrow B + Y_2 \quad \Delta G = -2.000 \text{ kal};$ senyawa Y_2 menangkap energi.
 $C + Y_2 \rightarrow D + Y_1 \quad \Delta G = -3.000 \text{ kal};$ senyawa Y_2 melepaskan energi.

Y disebut reaktan bersama bagi kedua reaksi tersebut. Pada reaksi pertama, ΔG keseluruhan sebesar -2.000 kal menunjukkan bahwa 8.000 dari jumlah semula sebesar 10.000 kal digunakan untuk mengubah Y_1 menjadi Y_2 ; artinya, 8.000 kal tertangkap atau disimpan dalam Y_2 . Pada reaksi kedua, Y_2 diubah kembali menjadi Y_1 , disertai pembebasan energi sebesar 8.000 kal yang tertangkap sebelumnya untuk mendorong pengubahan endergonik ($C \rightarrow D$).

Jadi ΔG reaksi keseluruhan ialah $(+5.000) + (-8.000)$, atau -3.000 kal (nilainya negatif, sehingga reaksi tersebut dapat berlangsung); jumlah energi yang dilepaskan pada reaksi pertama lebih besar daripada yang dibutuhkan untuk melangsungkan reaksi kedua. Reaktan bersama Y disebut sebagai senyawa kaya-energi atau senyawa pemindah energi-tinggi. Senyawa kaya energi semacam ini mengandung energi-potensial yang dapat dilepaskan kembali, misalnya melalui proses hidrolisis.

Di dalam sel terdapat berbagai macam senyawa kaya-energi. Pecahnya ikatan-ikatan tertentu dalam senyawa-senyawa ini akan melepaskan sebagian dari energi yang tersimpan di dalamnya.

Pada Tabel 9 berikut terdaftar beberapa senyawa kaya-energi yang terdapat dalam sel, antara lain adenosin trifosfat (ATP). ATP merupakan "mata uang energi" bagi sel dan merupakan medium pertukaran energi antara reaksi-reaksi eksergonik dan endergonik.

Tabel 9. Beberapa senyawa energi-tinggi dalam sel, serta perubahan energi-bebas bila mengalami hidrolisis

| Senyawa | ΔG° , kkal |
|-----------------------------|-------------------------|
| Adenosin trifosfat (ATP) | -7.3 |
| Adenosin difosfat (ADP) | -7.3 |
| Guanosin trifosfat (GTP) | -7.3 |
| Guanosin difosfat (GDP) | -7.3 |
| Uridin trifosfat (UTP) | -7.3 |
| Sitidin trifosfat (STP) | -7.3 |
| Asetil fosfat | -10.1 |
| Asam 1,3-difosfoglisarat | -11.8 |
| Asam fosfoenolpiruvat (PEP) | -14.8 |

Semua senyawa pada Tabel 9 tersebut dapat memindahkan energinya baik secara langsung maupun tidak langsung melalui pembentukan ATP. Pemindahan energi secara langsung, misalnya adalah pada reaksi

$\text{asam 1,3-difosfoglisarat} + \text{ADP} \rightarrow \text{asam 3-fosfoglisarat} + \text{ATP}$

Contoh pemindahan secara tidak langsung ialah :

1. $\text{Suksinil-koenzim-A} + \text{Pa} + \text{GDP} \rightarrow \text{Asam suksinat} + \text{GTP} + \text{koenzim-A Fosfat anorganik}$

2. $\text{GTP} + \text{ADP} \rightarrow \text{GDP} + \text{ATP}$

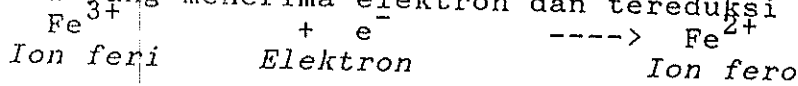
Tampak, bahwa ada energi yang dilepaskan dari ATP melalui proses hidrolisis. Senyawa ADP juga merupakan senyawa pemindah energi tinggi, karena hidrolisis ADP juga membebaskan sejumlah besar energi.

Oksidasi dan produksi energi

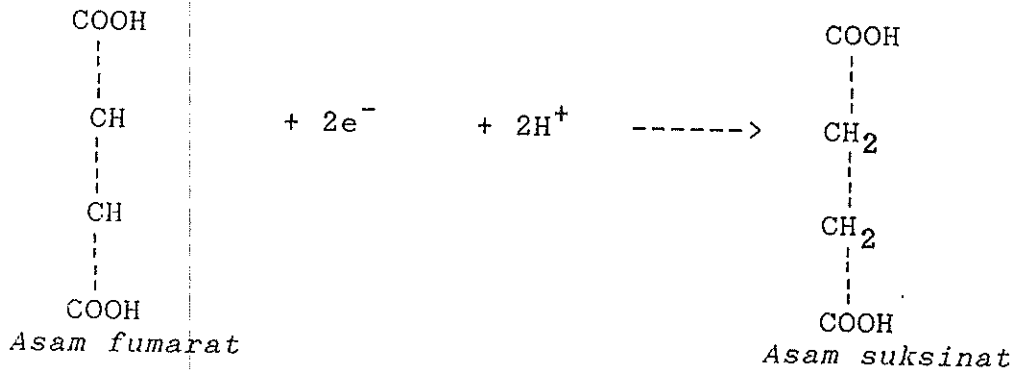
Oksidasi atau pernafasan adalah hilangnya elektron dari suatu molekul, selalu disertai dengan reduksi, yaitu diperolehnya elektron oleh molekul yang lain. Dengan perkataan lain, oksidasi merupakan proses pemindahan elektron dari satu molekul ke molekul lainnya; bilamana satu molekul dioksidasi, maka ada molekul lain yang direduksi.

Seringkali reaksi oksidasi merupakan dehidrogenasi, yaitu hilangnya atom hidrogen (H). Sebuah atom hidrogen terdiri atas sebuah proton (H⁺) dan sebuah elektron (e⁻). Jadi suatu senyawa yang kehilangan atom hidrogen akan kehilangan elektron. Jadi, senyawa yang kehilangan elektron berarti telah teroksidasi.

Suatu oksidan (bahan pengoksidasi) akan menerima elektron dan menjadi tereduksi. Pada contoh berikut, ion feri adalah pengoksidasi yang menerima elektron dan tereduksi menjadi ion fero.



Asam fumarat, suatu intermediat dalam metabolisme, merupakan contoh lain bahan pengoksidasi. Dalam reaksi berikut asam fumarat menerima atom-atom hidrogen, sehingga tereduksi menjadi asam suksinat



Konversi energi

Kiranya jelas, bahwa agar sel dapat melaksanakan fungsinya masing-masing, diperlukan suatu mekanisme suplai energi (dalam bentuk ATP). Pada dasarnya energi ini mula-mula berasal dari sinarsurya, yang diubah oleh sel ototrofik menjadi molekul organik yang kaya-energi melalui proses fotosintesis. Setelah tersimpan dalam bentuk molekul ATP, maka ATP ini dapat diurai (dikatabolik) lagi menjadi energi melalui proses pernafasan sel.

Semua sel mampu mengubah energi. Memang ada beberapa bakteri yang dapat memperoleh energi dari bahan kimia yang ada di lingkungannya melalui proses kemosintesis (chemosynthesis, yaitu mensintesis bahan kimia yang ada di lingkungannya), tetapi hanya beberapa sel khusus yang mampu menangkap energi surya.

Pernafasan sel

Pada proses pernafasan sel (disebut juga oksidasi atau pernafasan seluler), molekul organik yang kompleks, akan terpecah menjadi komponen anorganik, dan energi kimia yang tersimpan dalam struktur molekulnya akan keluar, sehingga dapat dipergunakan oleh sel. Karena semua sel memerlukan energi, maka proses ini bersifat universal.

Umumnya, pernafasan (respirasi) sel merupakan mekanisme oksidasi erobik, tetapi pada beberapa bakteri dan fungi ada yang berlangsung secara anerobik.

Pernafasan Karbohidrat

Glukosa merupakan bahan utama dan paling awal dipakai dalam proses pernafasan. Energi yang terkandung di dalam molekul glukosa secara bertahap akan dikeluarkan lagi pada saat pernafasan sel, dengan cara 'membebaskan' energi yang terikat pada ikatan fosfat (phosphate bond energy) yang ada di dalam ATP. Proses ini berlangsung amat efisien. Pada proses pernafasan erobik, hampir 50% energi yang tersedia di dalam molekul glukosa akan menjadi energi ikatan fosfat, sedang sisanya akan dibuang dalam bentuk panas.

Pernafasan di dalam sel berlangsung dalam 2 fase, yaitu

1. Glikolisis, yang merupakan fase persiapan yang dilakukan dengan cara memecah molekul 6-glukosa karbon menjadi 2 buah molekul karbon. Proses ini terjadi di dalam sitoplasma.
2. Siklus Krebs, yaitu proses siklis (berulang-ulang) yang menghasilkan karbon dioksida, air dan energi yang berasal dari molekul 3-karbon yang dihasilkan pada proses glikolisis.

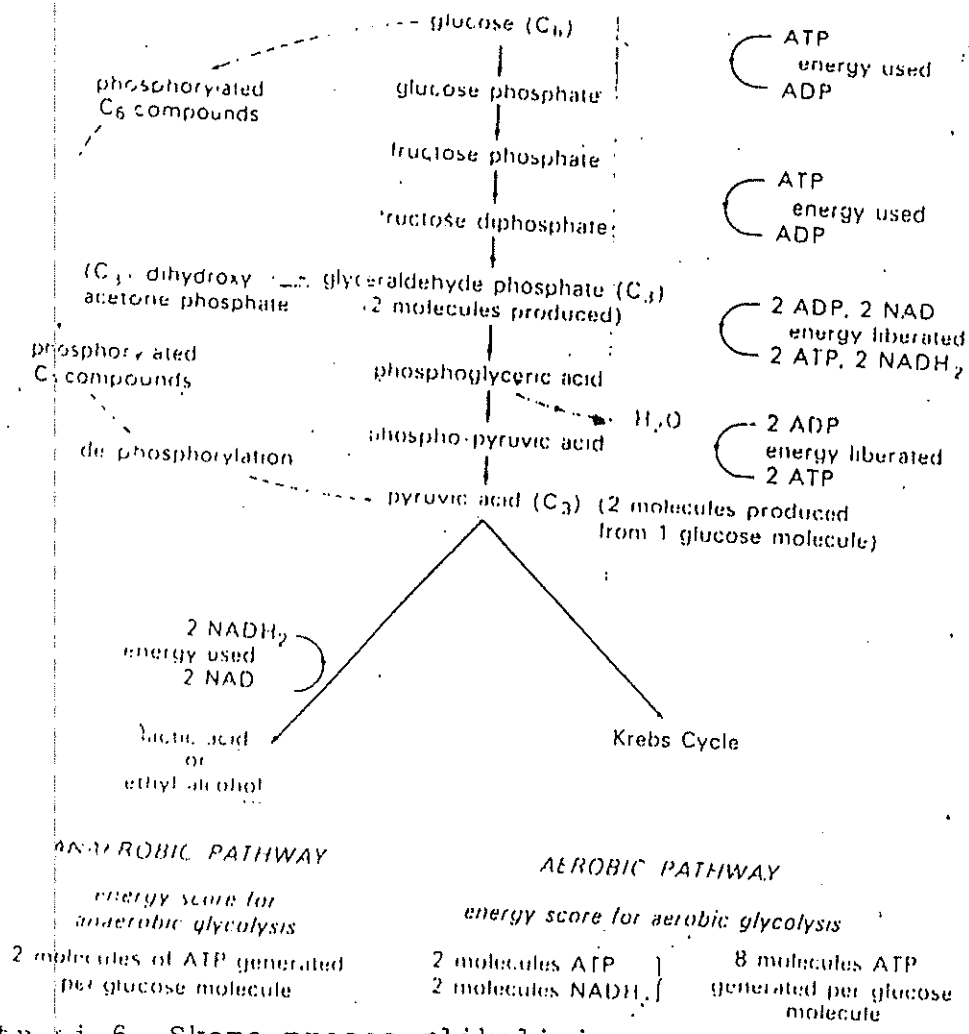
Proses ini berlangsung di mitokondria, dan memerlukan oksigen. Glikolisis. Pada proses glikolisis molekul glukosa akan terpecah menjadi 2 molekul asam piruvat. Proses ini dapat berlangsung, baik dalam keadaan anerobik maupun aerobik. Pada keadaan anerobik, asam piruvat diubah menjadi asam laktat (ini terjadi di dalam sel-sel hewan; di dalam sel tanaman asam piruvat ini diubah menjadi etil alkohol dan karbon dioksida).

Pada akhir proses anerobik ini, yang dibebaskan hanya kira-kira 3% energi yang tersimpan dalam molekul glukosa yang telah dipakai untuk membentuk 2 molekul ATP. Sel anerobik harus dapat berfungsi (bekerja) dengan jumlah energi yang sedikit ini. Jika tersedia oksigen (erobik), asam piruvat akan terpecah menjadi molekul karbon dioksida pada siklus Krebs, yang akan menghasilkan lebih banyak energi.

Glikolisis merupakan proses yang kompleks. Terdiri atas kira-kira 11 reaksi, masing-masing dikatalisis oleh enzim yang berbeda, sehingga energi molekul glukosa dapat dikeluarkan secara efisien. Mula-mula terjadi fosforilasi molekul glukosa, sehingga terbentuk glukosa-6-fosfat. Molekul glukosa yang aktif ini akan berfungsi dalam serangkaian reaksi yang menghasilkan 2 molekul asam piruvat.

Pada saat pernafasan anerobik, 2 molekul NADH_2 akan mereduksi asam piruvat menjadi asam laktat atau etil alkohol. Pada pernafasan erobik, asam laktat dan etil alkohol akan dioksidasi menjadi NAD melalui rantai pernafasan, dengan membentuk 3 molekul ATP pada setiap molekul NADH_2 yang dioksidasi. Oleh karena itu, energi yang diperoleh pada proses glikolisis lebih banyak jika ada oksigen (erobik). Satu molekul glukosa dalam proses glikolisis hanya akan menghasilkan energi untuk membentuk 2 molekul ATP jika tidak ada oksigen, tetapi akan diperoleh 8 molekul ATP jika ada oksigen.

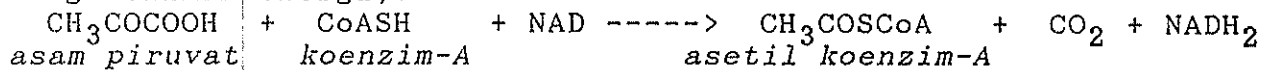
Skema proses glikolisis tersaji pada Ilustrasi 6.



Ilustrasi 6. Skema proses glikolisis

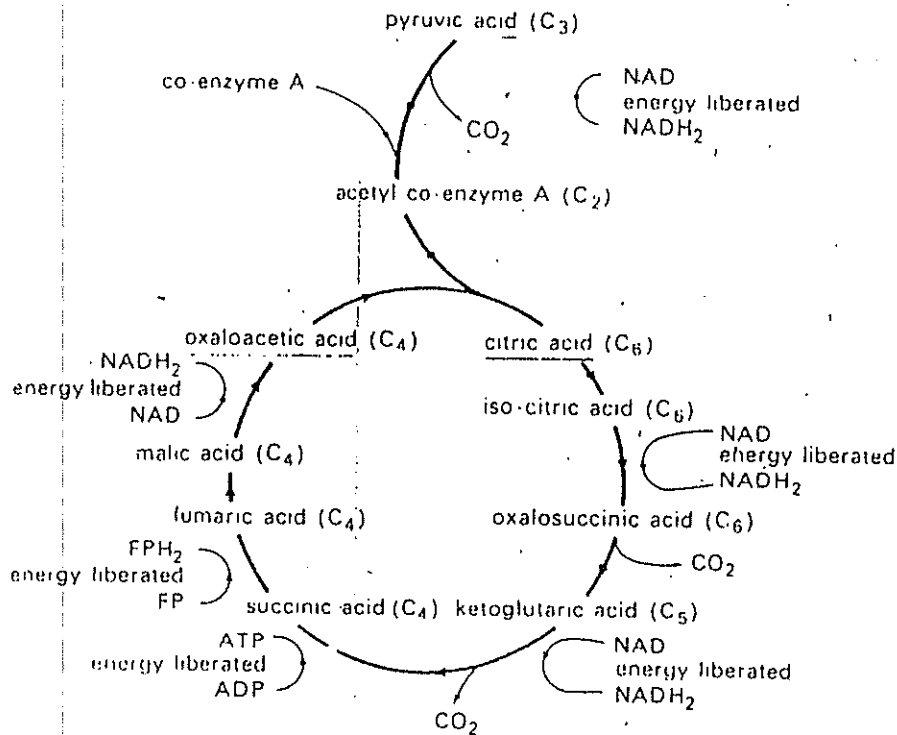
Siklus Krebs. Siklus Krebs disebut juga siklus asam trikarboksilat atau siklus asam sitrat. Setelah glukosa dipecah menjadi asam piruvat dalam proses glikolisis, sel-sel erobik dapat memanfaatkan siklus Krebs untuk memperoleh lebih banyak energi yang masih tersisa dalam molekul. Proses ini berlangsung di mitokondria.

Mula-mula asam piruvat mengalami dekarboksilasi (membuang grup karboksil) dalam suatu reaksi dengan bantuan koenzim-A. Koenzim-A ini merupakan pembawa asetil (acetyl carrier) dan pembawa energi. Grup asetil dari molekul asam piruvat akan terikat dengan koenzim-A untuk membentuk koenzim-A asetil. Selanjutnya, karbondiosida akan keluar, dan hidrogen akan terikat ke pembawa NAD (NADH₂ nantinya akan dioksidasi sehingga menghasilkan energi).



Koenzim-A asetil dianggap merupakan titik awal dalam siklus Krebs. Ia akan berkombinasi dengan molekul akseptor (yaitu asam osaloasetat) membentuk asam sitrat yang nantinya akan dipecah dalam berbagai reaksi. Mula-mula asam sitrat dipecah menjadi asam ketoglutarat, lalu menjadi asam suksinat. Mungkin juga molekul diubah kembali ke molekul akseptor (asam osaloasetat), sehingga siklus Krebs dapat dimulai lagi (siklis).

Dalam siklus Krebs, karbondiosida akan keluar, begitu juga dengan ion hidrogen energi-tinggi bebas yang nantinya akan terikat dengan pembawa NAD atau FP. Pembawa yang tereduksi akan dioksidasi dalam rantai pernafasan; di sini energinya diangkut (ditransfer) menuju ikatan molekul ATP.

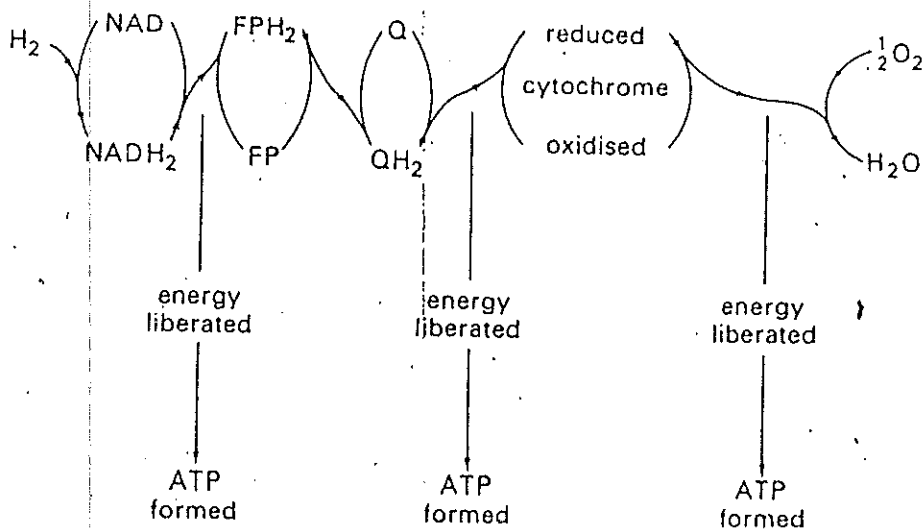


AEROBIC PATHWAY

| | | | |
|--|---------------------|-----------------------|---|
| Energy score for the Krebs cycle | 1 ATP | } molecules generated | = 15 molecules of ATP generated per pyruvic acid molecule |
| | 1 FPH ₂ | | |
| | 4 NADH ₂ | | |
| total = 30 molecules of ATP generated per glucose molecule | | | |

Ilustrasi 7. Skema siklus Krebs

Pembawa hidrogen dalam rantai pernafasan selalu bekerja dalam urutan tertentu (lihat Ilustrasi 8). Mula-mula melibatkan NAD, lalu ferroprotein (FP) (FP mungkin berbentuk flavin mononukleotida/FMN atau flavin adenin dinucleotida/FAD), selanjutnya melibatkan kuinon, dan akhirnya serangkaian sitokrom (yaitu kromoprotein yang berisi besi), yang melalui ion hidrogen menuju molekul oksigen untuk membentuk air. Hanya sampai di sini proses pernafasan aerobik memerlukan oksigen, jika tidak ada oksigen, siklus Krebs akan berhenti dan hasil akhirnya adalah asam piruvat dan bukan karbon dioksida.



Ilustrasi 8. Skema aliran hidrogen pada rantai pernafasan

Secara kimiawi, reaksi pembakaran adalah seperti tersaji pada Tabel 10. Tampak ada perbedaan unsur kimia yang dihasilkan pada setiap reaksi.

Tabel 10. Persamaan reaksi kimia proses pembakaran

| Pernafasan aerobik | |
|-------------------------|--|
| $C_6H_{12}O_6 + 6 CO_2$ | $\rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2 O + \text{energi}$ |
| Pernafasan anaerobik | |
| $C_6H_{12}O_6 +$ | $\rightarrow 2 CH_3CHOH COOH + \text{energi (dalam sel hewan)}$ |
| $C_6H_{12}O_6 +$ | $\rightarrow 2 C_2H_5OH + 2CO_2 + \text{energi (dalam sel tanaman)}$ |

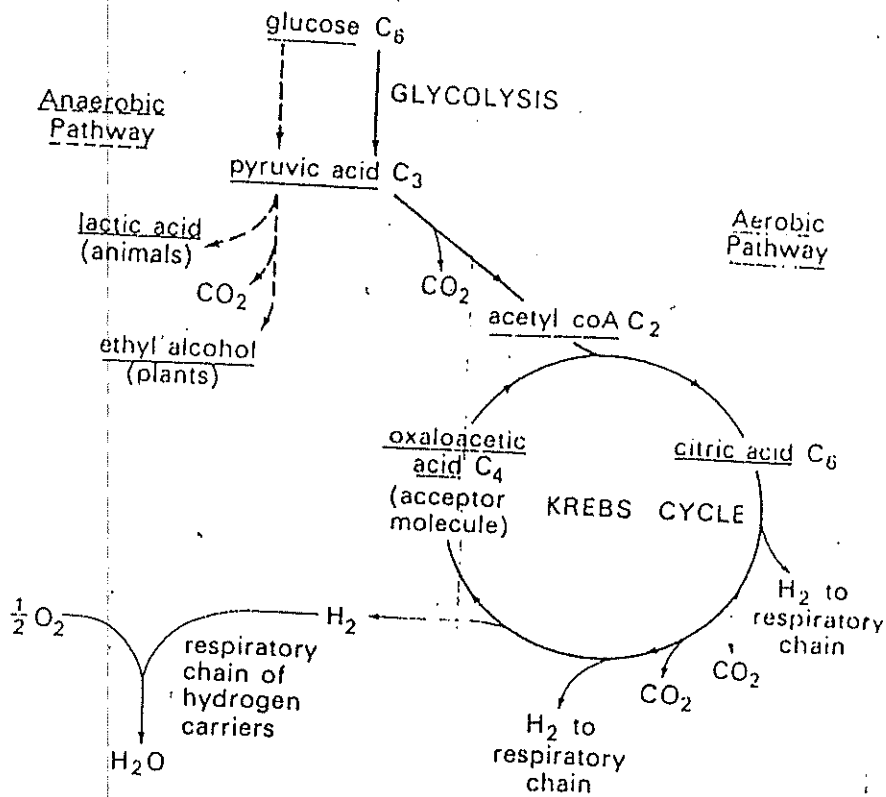
Selanjutnya, untuk mengetahui kaitan antara glikolisis dan siklus Krebs, yang merupakan proses pernafasan, disajikan Ilustrasi 9 pada halaman berikut.

Jalur pentosa

Ada jalur lain bagi oksidasi glukosa yang cukup penting, yaitu jalur pentosa. Jalur ini melalui gula 5-karbon, ribulosa-5-fosfat, dan yang merupakan sumber utama ribosa dan gula deoksiribosa, komponen asam nukleat, dan nukleotida lain, seperti ATP, NAD dan FAD. Ribulosa-5-fosfat merupakan titik awal sintesis berbagai macam gula dan derivat hasil fosforilasinya, ribulosa difosfat, yang berlaku sebagai molekul akseptor karbon dioksida dalam proses fotosintesis.

Hasil energi proses pernafasan

Aliran ion hidrogen melalui rantai pernafasan akan menghasilkan cukup banyak energi guna membentuk 3 molekul ATP, jika dimulai dari NADH₂, tetapi hanya akan menghasilkan 2 molekul ATP jika dimulai dari FPH₂. Tabel 11 berikut menyajikan hasil energi pernafasan setiap molekul glukosa, baik secara aerobik maupun secara anaerobik.



Ilustrasi 9. Skema proses pernafasan

Tabel 11. Hasil energi setiap molekul glukosa dalam proses pernafasan sel

| | | |
|------------------------|-----------------------------|------------------|
| ===== | | |
| 1. Pernafasan anerobik | | |
| Glikolisis | | • 2 molekul ATP |
| | Jumlah | 2 molekul ATP |
| 2. Pernafasan aerobik | | |
| 2.1. Glikolisis | | 2 molekul ATP |
| 2.2. Siklus Krebs | 2 molekul NADH ₂ | = 6 molekul ATP |
| (1 molekul glukosa | 2 molekul FPH ₂ | = 4 molekul ATP |
| menghasilkan 2 molekul | 3 molekul NADH ₂ | = 24 molekul ATP |
| asam piruvat) | | |
| | Jumlah | 38 molekul ATP |
| ===== | | |

Bahan bakar untuk pernafasan

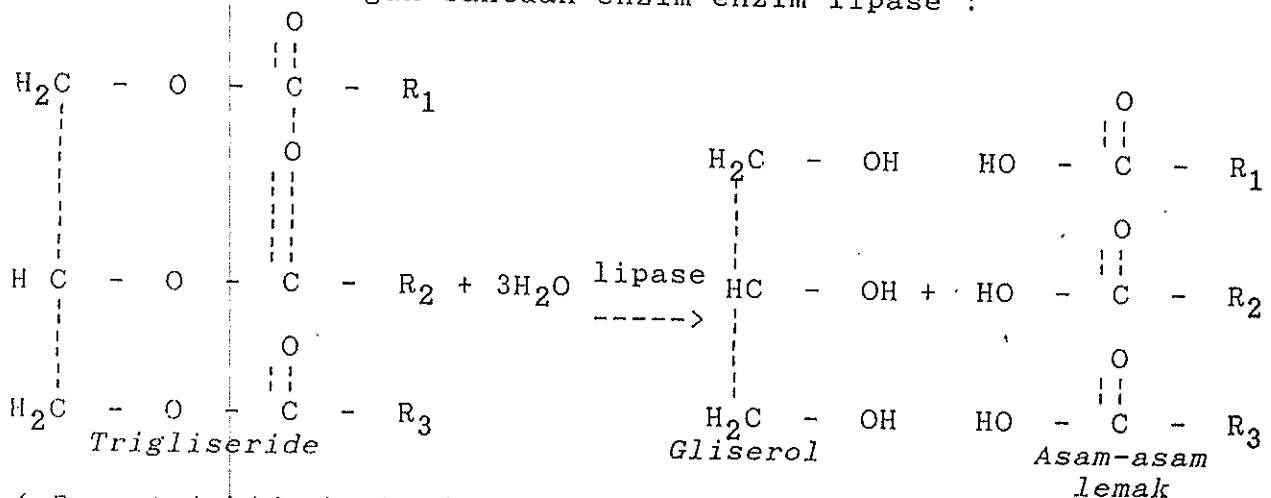
Secara normal, bahan bakar bagi sebagian besar sel berasal dari oksidasi karbohidrat, tetapi kadang-kadang juga berasal dari lemak dan protein.

Karbohidrat. Sebagian besar sel menerima suplai glukosa yang dapat dioksidasi secara langsung melalui berbagai jalur yang telah diuraikan di atas. Karbohidrat cadangan (dalam bentuk polisakarida) harus dihidrolisis terlebih dahulu menjadi komponen monosakarida sebelum memasuki proses pernafasan. Sel hewan berisi

cadangan glikogen, misalnya di hati dan sel otot, memiliki enzim yang dapat memisahkan unit-unit glukosa yang ada pada rantai glikogen dan mengubahnya menjadi glukosa-6-fosfat. Lemak. Pada umumnya, lemak hanya dijadikan sumber energi utama jika glukosa habis atau terbatas jumlahnya, misalnya jika puasa dalam waktu yang cukup lama, penyakit (misalnya diabetes), dan lain-lain.

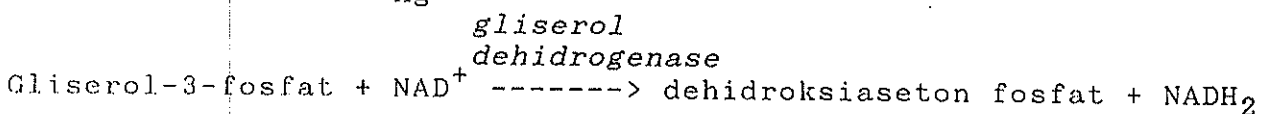
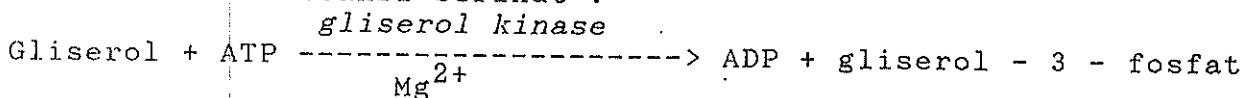
Dalam proses pernafasan, mula-mula lemak dihidrolisis menjadi asam lemak dan gliserol. Gliserol diubah menjadi dihidroksiaseton fosfat, yang akan memasuki jalur glikolisis. Asam lemak akan dipecah menjadi asetat, yang akan berkombinasi dengan koenzim-A guna membentuk asetil koenzim-A, sehingga dapat memasuki siklus Krebs.

Perombakan lipid atau lemak diawali dengan pecahnya trigliserida karena penambahan air sehingga terbentuk gliserol dan asam lemak dengan bantuan enzim-enzim lipase :



(-R=rantai hidrokarbon)

Gliserol sebagai komponen lemak dapat diubah menjadi intermediat melalui jalur glikolitik (dihidroksiaseton fosfat) melalui reaksi-reaksi berikut :



Selanjutnya, dihidroksiaseton fosfat yang terbentuk akan diuraikan. Asam-asam lemak dioksidasi dengan cara mengeluarkan fragmen berkarbon-dua dalam bentuk asetil-KoA. Asetil-KoA yang terbentuk kemudian dapat memasuki siklus Krebs, sedangkan atom-atom hidrogen beserta elektron-elektronnya memasuki rantai angkutan elektron menuju fosforilasi oksidatif.

Ada lebih banyak energi hasil pernafasan per gram lemak daripada per gram karbohidrat.

Protein. Protein amat vital bagi struktur dan fungsi sel, sehingga dipakai sebagai sumber energi hanya jika cadangan lemak amat rendah, atau jika ransumnya banyak berisi protein.

Protein dihidrolisis menjadi asam amino, yang lalu mengalami demaminasi menjadi asam keton dan amonia. Amonia akan dikeluarkan

dari sel dalam bentuk amonia bebas, asam urat atau urea. Asam keton dapat dalam bentuk asam piruvat, asam ketoglutarat, atau asam oksaloasetat. Asam keton ini dapat memasuki jalur pernafasan (siklus Krebs).

Banyak bakteri heterotrofik dapat menghancurkan protein di luar tubuhnya dan menggunakan produk-produk hasil proses tersebut sebagai sumber energi, karbon, dan nitrogen. Karena molekul protein terlampau besar untuk dapat melewati membran, maka bakteri mengekskresikan eksoenzim yang disebut protease untuk menghidrolisis protein tersebut menjadi peptida.

Bakteri menghasilkan peptidase yang menguraikan peptide menjadi asam-asam amino individu, yang kemudian dikatabolisme melalui cara yang bergantung pada tipe asam aminonya dan spesies atau galur bakteri yang menguraikannya. Proses ini adalah sebagai berikut :

Protein $\xrightarrow{\text{protease}}$ peptide $\xrightarrow{\text{peptidase}}$ asam amino

Jika asam amino diuraikan, kerangka karbon asam-asam amino tersebut mengalami peruraian oksidatif menjadi senyawa-senyawa yang dapat memasuki siklus Krebs untuk dioksidasi. Masuknya ke dalam siklus Krebs dapat melalui asetil-KoA, asam-ketoglutarat, asam suksinat, asam fumarat, atau asam oksaloasetat.

Untuk melihat penggunaan berbagai bahan bakar dalam proses pernafasan sel secara umum, disajikan Ilustrasi 10.

Pernafasan anerobik pada beberapa bakteri

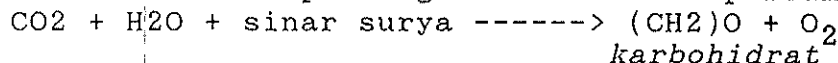
Sebagian bakteri yang biasanya bersifat aerobik dapat tumbuh secara anaerobik bila ada nitrat. Misalnya, *Spirillum itersonii*, sejenis bakteri akuatik; jika ada kalium nitrat di lingkungan hidupnya, pada hakikatnya nitrat menggantikan oksigen sebagai penerima terakhir elektron dalam rantai respirasi. Proses ini disebut respirasi-anaerobik.

Jalur untuk disimilasi sumber-sumber karbon dan energi sama dengan yang dipergunakan dalam respirasi aerobik, dan angkutan elektron berlangsung melalui rantai respirasi, serupa seperti pada sel-sel aerobik. Oksigen digantikan oleh nitrat sebagai penerima terakhir elektron. Namun, pada beberapa anerobik sejati, senyawa-senyawa anorganik lainnya, seperti karbon dioksida, atau ion-ion seperti ion sulfat, dapat berlaku sebagai penerima terakhir elektron.

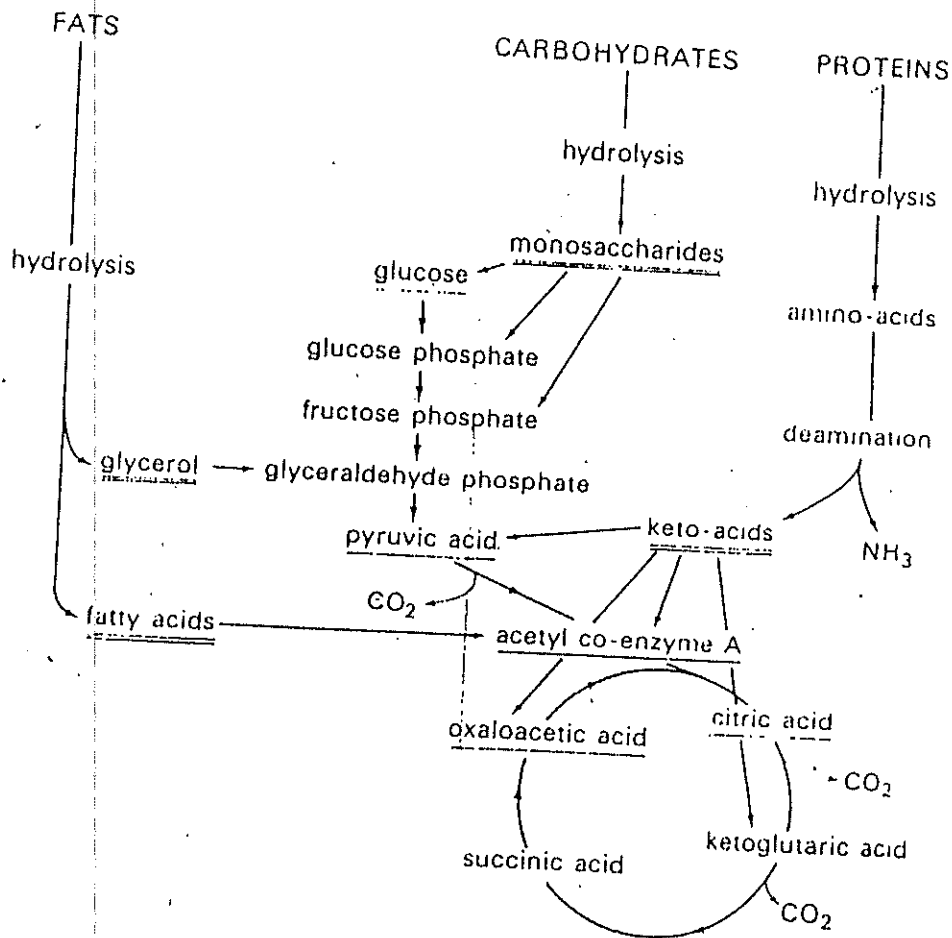
Fotosintesis

Proses fotosintesis amat penting bagi makhluk hidup, karena merupakan langkah pertama pembentukan molekul organik dari bahan anorganik. Hanya sel tanaman berklorofil yang dapat melakukan fotosintesis ini.

Fotosintesis dapat digambarkan dalam persamaan berikut.



Persamaan di atas hanya menunjukkan input dan output total, Sebenarnya reaksi tersebut terdiri atas suatu seri reaksi intermedier yang amat kompleks.



Ilustrasi 10. Bahan bakar dalam proses pernafasan sel

Fotosintesis dapat dibagi menjadi tiga tahapan.

1. Fotolisis, yaitu reaksi cahaya yang menguraikan karbondioksida menjadi atom-atom komponennya, lalu menyimpan beberapa energi cahaya dalam bentuk ATP.
2. Pengikatan karbondioksida, yaitu reaksi kimia yang mengkombinasikan karbondioksida dengan hidrogen yang dilepaskan oleh karbohidrat triosa sederhana melalui proses fotolisis.
3. Pengubahan karbohidrat, yaitu karbohidrat sederhana diubah menjadi monosakarida heksosa dan karbohidrat terpolimer.

Mitokondria dan pernafasan sel

Mitokondria merupakan 'power house' atau dapur bagi sel, karena sebagian besar pernafasan erobik seluler berlangsung di dalamnya. Fase glikolitik berlangsung di sitoplasma yang berada di sekitar mitokondria. Asam piruvat, akan memasuki mitokondria, lalu dipecah menjadi karbon dioksida dan air. Enzim yang aktif dalam siklus Krebs terdapat dibagian matriks internal mitokondria, dan bahan-bahan yang terlibat dalam rantai pernafasan, secara bertahap akan terikat pada membran lipoprotein yang melapisi membran pada permukaan bagian dalam kristae.

Penggunaan energi dalam proses nonbiosintetik

Sudah diketahui, bahwa energi ATP yang terbentuk melalui reaksi-reaksi disimilasi di dalam sel dipergunakan untuk berbagai keperluan. Sejumlah besar energi digunakan untuk melakukan proses biosintesis struktur sel seperti dinding sel, membran sel, dan granula-granula penyimpan energi. Selain itu, ATP juga dibutuhkan untuk sintesis enzim dan substansi-substansi kimiawi lainnya, pemeliharaan integritas fisika dan kimiawi sel, dan reparasi kerusakan sel. Proses-proses lain yang menggunakan ATP adalah gerak, produksi panas, pengangkutan larutan melintasi membran, dan bioluminesens.

Diduga, yang berperan utama dalam pembentukan panas (suhu) badan adalah enzim ATP-ase. Peran fisiologis enzim ini adalah untuk membuang kelebihan ATP, sehingga dapat membantu mengatur metabolisme energi sel.

Hilangnya energi dari ikatan-ikatan fosfat berenergi-tinggi dalam bentuk panas juga terjadi melalui cara-cara lain. Sebagai contoh, sintesis ikatan ester atau amida, hanya membutuhkan kira-kira 3.000 kalori, sedang pemecahan ikatan fosfat berenergi-tinggi (untuk membentuk ikatan ester atau amida tersebut) melepaskan 12.000 kalori. Karena itu, energi yang tidak digunakan dalam pembentukan ikatan ester atau amida adalah 9.000 kalori yang dilepaskan sebagai panas.

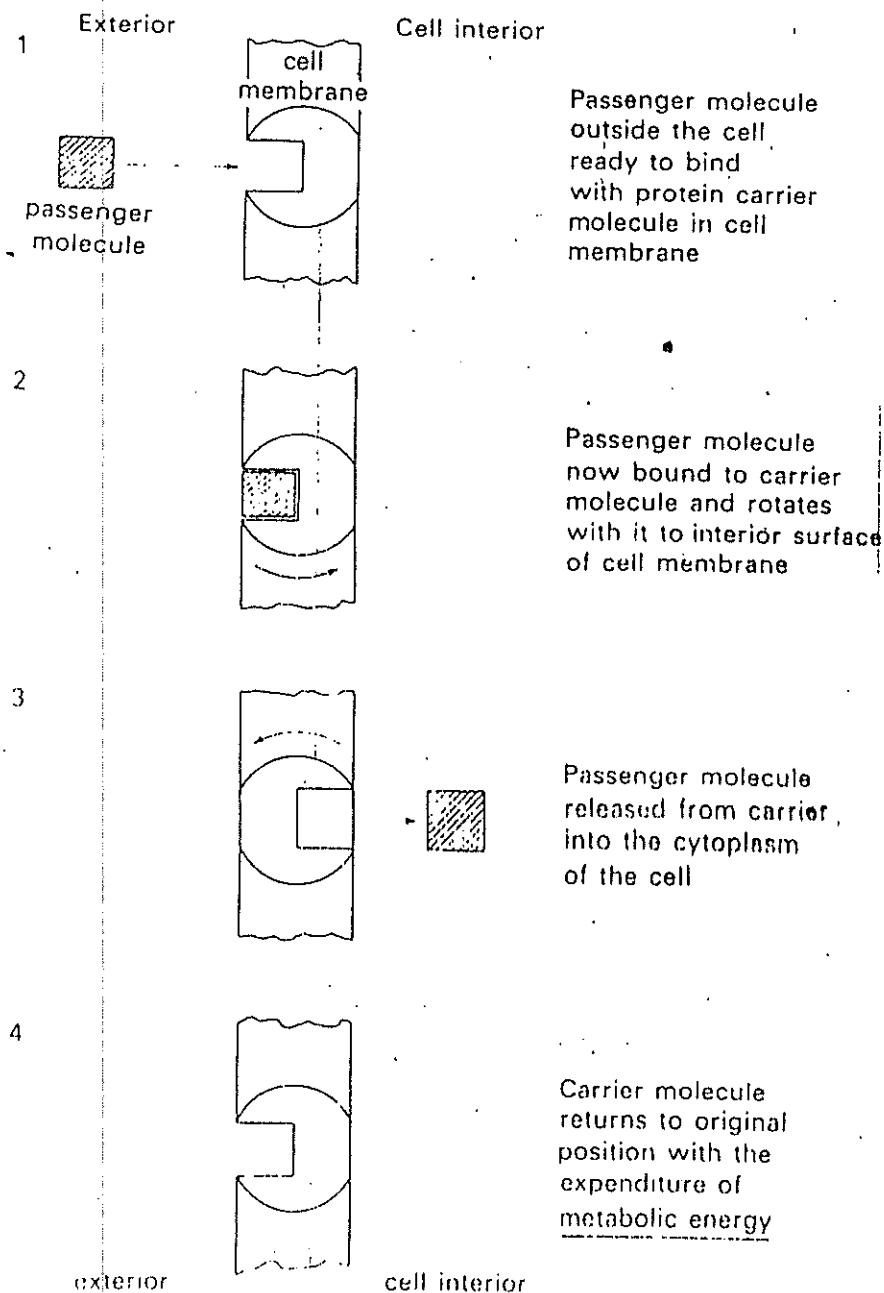
Transpor nutrien

Bahan-bahan yang terkandung dalam pakan dapat memasuki sel melalui proses difusi pasif (difusi sederhana), difusi dipermudah (facilitated diffusion), translokasi kelompok, dan transpor aktif. Difusi pasif. Selain air dan beberapa molekul yang larut dalam lemak, beberapa jenis senyawa kimia dapat memasuki sel melalui difusi pasif. Dalam proses ini larutan melintasi membran yang semipermeabel, karena ada gerakan molekul (yang bersifat acak). Difusi dipermudah. Mekanisme lain untuk membawa molekul melintasi membran semipermeabel adalah difusi dipermudah. Di sini, molekul larutan bergabung dengan suatu molekul penghantar protein khusus pada membran yang akan membentuk kompleks larutan-penghantar. Kemudian kompleks larutan-penghantar tersebut bergerak di antara permukaan-permukaan membran sebelah dalam dan luar, melepaskan satu molekul larutan. Tipe difusi ini dapat melepaskan molekul-molekul larutan dari daerah konsentrasi larutan yang tinggi ke konsentrasi larutan yang lebih rendah.

Difusi sederhana maupun difusi dipermudah tidak membutuhkan energi metabolik, dan tidak menyebabkan perubahan konsentrasi larutan yang dapat melawan gradien elektrokimiawi atau osmotik. Karena itu, kedua mekanisme tersebut tidak begitu penting artinya dalam penggunaan energi.

Selain itu, ada mekanisme lain untuk mengangkut larutan melintasi membran, yaitu translokasi-kelompok dan transpor aktif, yang membutuhkan energi metabolik.

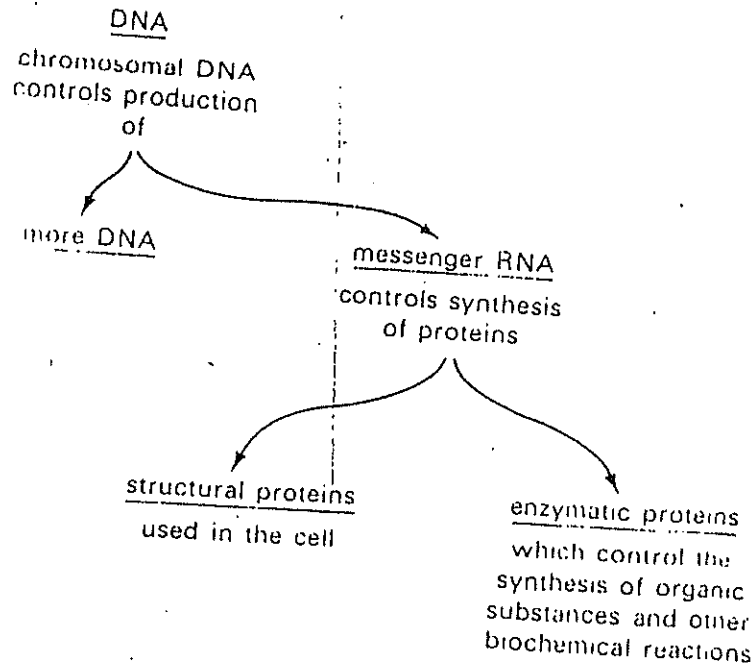
Translokasi kelompok. Pada translokasi kelompok, substansi yang akan diangkut harus dimodifikasi dulu secara kimiawi sebelum diangkut ke dalam sel oleh penghantar. Contoh translokasi kelompok adalah transpor senyawa gula tertentu, seperti glukosa, fruktosa, dan manosa, ke dalam sel bakteri. Mula-mula suatu protein yang tahan panas (HPr) diaktivasi dengan cara memindahkan sebu-



Ilustrasi 11. Skema konsep transpor aktif

Pada sintesis asam amino prolin oleh bakteri *Escherichia coli*, asam glutamat merupakan reaktan awalnya. Mula-mula, sebuah gugus asam (-COOH) direduksi menjadi gugus aldehida (-CHO). Di sini dibutuhkan dua elektron dari NADPH_2 dan energi dari ATP. Gugus aldehida tersebut bereaksi dengan gugus amino (-NH₂) pada molekul yang sama, membentuk cincin. Langkah ini diikuti dengan reduksi cincin untuk membentuk prolin. Contoh lain ialah perubahan asam aspartat menjadi lisin, metionin, dan treonin. Perubahan ini menggunakan energi yang berasal dari ATP. Kedua contoh di atas menggambarkan cara energi dipakai untuk saling

mengubah (interkonversi) satu substansi menjadi substansi lainnya.



Ilustrasi 12. Skema sintesis protein

Sintesis makromolekul. Biosintesis yang lain adalah penggabungan molekul-molekul yang lebih kecil untuk membentuk molekul yang lebih besar, yaitu sintesis makromolekul.

Sintesis organik pada bakteri kemoautotrofik. Bakteri kemoautotrofik tidak membutuhkan nutrisi organik dan hanya menggunakan karbon dioksida sebagai sumber karbon satu-satunya. Bakteri ini mengoksidasi nutrisi anorganik (misalnya hidrogen, amonia, nitrit, dan diosulfat) untuk menghasilkan energi metabolik dalam bentuk ATP dan dalam beberapa hal tenaga pereduksi dalam bentuk NADPH₂.

Elektron-elektron yang berasal dari oksidasi nutrisi anorganik oleh bakteri kemoautotrofik biasanya memasuki rantai transpor elektron pada titik yang lebih tinggi.

Mekanisme sintesis ATP

Masih belum jelas cara elektron, melalui rantai transpor elektron, dapat berhubungan dengan sintesis ATP. Teori yang ada sekarang ialah hipotesis kemiosmotik yang menduga, bahwa aliran elektron melewati sistem molekul pembawa melepaskan energi yang mendorong ion-ion hidrogen bermuatan positif (H⁺), atau proton, melintasi membran-membran kloroplas, mitokondria, dan sel bakteri.

Gerakan ion-ion hidrogen ini menyebabkan menjadi asamnya medium tempat terdapatnya organel dan sel dan terciptanya gradien pH (perbedaan pH) antara kedua bagian membran organel atau sel. Selain itu, gerakan ion hidrogen menyebabkan terbentuknya gradien tegangan listrik (electric potential gradient yaitu perbedaan

muatan) melintasi membran (karena muatan listrik dibawa oleh proton). Dengan cara ini energi yang dibebaskan selama pemindahan elektron melalui rantai angkutan elektron disimpan sebagai daya proton motif ("proton motive force"); gradien tegangan listrik terbentuk dengan cara dipompanya ion-ion hidrogen melintasi membran.

Setelah langkah konservasi energi yang pertama ini, ketika ion-ion hidrogen memasuki kembali organel atau sel; ion-ion tersebut dibawa oleh enzim adenosin trifosfatase yang terikat pada membran. Energi yang dilepaskan pada saat masuknya kembali itu mendorong sintesis ATP.

Gerakan . Menurut perkiraan, 10 persen dari energi yang dipakai oleh mikroba digunakan untuk gerakan flagela.

Latihan

1. Apa perbedaan antara katabolisme dengan anabolisme ?
2. Apa arti
 - a. penggabungan reaksi-reaksi kimia ?
 - b. perubahan energi-bebas
 - c. eksergonik dan endergonik
 - d. reaktan bersama
 - e. senyawa kaya-energi
3. Sebutkan beberapa senyawa energi-tinggi dalam sel, serta perubahan energi-bebasnya bila mengalami hidrolisis
4. Sebut perbedaan pemindahan energinya baik secara langsung maupun tidak langsung melalui pembentukan ATP.
5. Apa arti oksidasi ? Apa kaitannya dengan reduksi dan dehidrogenasi ?
6. Uraikan konversi energi sinarsurya menjadi energi kimia dan energi panas (dimana, oleh organisme apa, bentuk energinya)
7. Pernafasan sel berlangsung secara erobik atau anerobik ?
8. Apakah konversi energi yang tersedia di dalam molekul glukosa menjadi energi ikatan fosfat berlangsung dengan efisien ?
9. Uraikan 2 fase pernafasan di dalam sel (di mana, reaksi kimia, enzim, metabolit, produk akhir, dan sebagainya).
10. Buat skema produk energi setiap molekul glukosa dalam proses pernafasan sel
11. Secara normal, apa yang menjadi bahan bakar proses pernafasan ? Di mana pembakaran itu berlangsung ?
12. Uraikan proses fotosintesis (di mana, reaksi kimia, tahapan reaksi)
13. Apa peranan mitokondria ?
14. Untuk apa saja energi ATP yang terbentuk melalui reaksi-reaksi disimilasi di dalam sel ?
15. Bagaimana cara bahan-bahan yang terkandung dalam pakan dapat memasuki sel ? Cara mana yang memerlukan energi ?
16. Bandingkan translokasi kelompok dan transpor aktif (substansi yang ditranspor, enzim yang berperan).
17. Uraikan langkah-langkah transpor aktif.
18. Apa reaktan awal sintesis asam amino prolin oleh bakteri *Escherichia coli* ?
19. Uraikan Mekanisme sintesis ATP

4. METABOLISME ENERGI

Secara kimiawi, organisme hidup terdiri atas susunan molekul, yang merupakan suatu sistem kimia fisika. Sistem ini bersifat kompleks, dinamis dan mampu menjaga stabilitas (mempertahankan diri) terhadap pengaruh lingkungan luar.

Agar sistem dinamis yang dimiliki setiap organisme hidup itu dapat dipertahankan, diperlukan energi. Energi, yang merupakan dasar sistem kimia fisika yang menyusun organisme, berasal dari pernafasan bahan organik yang terkandung di dalam pakan, yaitu karbohidrat, lemak, dan protein. Air, mineral, dan vitamin, meskipun diperlukan, bukan merupakan sumber energi.

Metabolisme energi merupakan proses penyimpanan energi (pembentukan molekul tempat energi disimpan), dan proses penggunaan energi untuk memenuhi kebutuhan kehidupan. Penyimpanan energi disebut anabolisme, sedang penggunaan energi disebut katabolisme.

Pemasukan dan penggunaan energi hewan

Jika suatu bahan pakan dibakar secara langsung, akan diperoleh gross income of energy, tetapi jika dikonsumsi (dimakan) oleh hewan, ada bagian pakan yang tidak tercerna (sehingga tidak dapat diserap) dan dikeluarkan lagi dalam bentuk feces, yang sebenarnya masih mengandung energi. Bagian pakan yang tercerna akan diserap.

Sebagian bahan yang diserap akan dikeluarkan lagi dari badan, misalnya dalam bentuk urine. Urine mengandung energi juga, sehingga ini berarti, ada energi yang sudah dikonsumsi, yang dibuang ke luar badan.

Pada herbivora, ada proses fermentasi di dalam alat pencernaannya, yang membentuk gas-dapat-terbakar (combustible gases), utamanya metan. Energi metan ini sebagian akan dipergunakan oleh herbivora. Selain itu, pada saat mencerna, terbentuk panas juga (energi pencernaan), yang merupakan heat increment yang menimbulkan calorogenic effect pakan tersebut.

Gross income of energy, setelah dikurangi energi feces, energi urine, energi gas-mudah-terbakar dan energi pencernaan, merupakan net income of energy.

Pada herbivora, kira-kira 28% energi pakan terbuang bersama feces, 5% bersama urine, dan 9% bersama gas-mudah-terbakar. Jumlah energi yang terbuang seperti ini tergantung komposisi ransum.

Energi yang masuk badan hewan tersebut dipergunakan untuk melangsungkan berbagai proses faali. Dalam keadaan yang seimbang, energi yang masuk akan sama dengan energi yang dipergunakan. Penggunaan energi oleh hewan dapat diukur dengan kalorimetri.

Pernafasan seluler

Kiranya sudah diketahui, bahwa sumber energi bagi semua makhluk hidup adalah sinarsurya, yang melalui proses fotosintesis, akan diubah menjadi energi kimia yang kaya-energi. Energi kimia hasil fotosintesis ini, oleh berbagai macam organisme lain (herbivora, karnivora, omnivora), akan dilepaskan kembali melalui proses pernafasan sel, baik secara aerobik maupun

secara anerobik. Pernafasan merupakan proses pemecahan molekul organik yang kompleks menjadi komponen anorganik, sehingga energi yang terkandung di dalamnya akan terlepas.

Substrat proses pernafasan utamanya adalah karbohidrat, selain lemak dan protein. Umumnya, lemak baru dipakai jika cadangan karbohidrat hanya sedikit, misalnya karena puasa atau sakit. Protein berguna untuk menjaga struktur dan fungsi sel, sehingga baru dipakai jika karbohidrat atau lemak sudah terbatas. Proses pernafasan sel telah dibahas pada bab-bab terdahulu.

Pada organisme tingkat tinggi, misalnya mamalia, ada beberapa tahap yang harus ditempuh sebelum terjadi pernafasan tingkat sel, yaitu:

1. Tingkah laku mencari dan menangkap mangsa (pakan).
2. Memakan, mencerna dan menyerap nutrien ke dalam cairan badan.
3. Angkutan (transpor) nutrien dan oksigen ke sel, serta sisa metabolisme dari sel, melalui sistem sirkulasi.
4. Pembuangan bahan sisa pencernaan

Pengukuran energi metabolisme

Jika 1 mole (180 gram) glukosa dibakar diudara terbuka (yang berisi oksigen), akan diperoleh 673 kkal (kilokalori), serta karbondioksida dan air.

Berdasar hukum termodinamika, oksidasi (di dalam badan) suatu bahan akan menghasilkan sejumlah energi, dengan mengabaikan cara atau proses oksidasi itu berlangsung. Artinya, jumlah energi hasil oksidasi tidak tergantung pada jumlah (tahap) reaksi kimia. Karena itu, oksidasi 1 mole glukosa di dalam sel (yang berlangsung lambat) mestinya juga menghasilkan 673 kkal/ mole.

Pada karbohidrat dan lemak, jumlah panas yang dihasilkan, baik pada pembakaran langsung di luar badan atau oksidasi di dalam badan adalah sama; setiap gram karbohidrat menghasilkan 4,1 kkal, sedang 1 gram lemak menghasilkan 9,3 kkal. Pada protein, agak berbeda. Bahan ini tidak dapat dioksidasi secara sempurna seperti jika dibakar diluar badan, karena beberapa derivat protein, utamanya urea, tidak dioksidasi, melainkan dibuang ke luar. Nilai panas 1 gram protein jika dioksidasi kira-kira 4,1 kkal; ini hanya 75% jika protein dibakar di luar.

Energi hasil proses metabolisme dapat diukur. Ada dua cara mengukur, yaitu secara langsung dan secara tidak langsung; dengan mempergunakan kalorimeter. Pengukuran secara langsung dilakukan berdasar prinsip jumlah energi yang diproduksi hewan per satuan waktu tidak tergantung pada jumlah tahap reaksi kimianya. Di sini, hewan (kecil) ditempatkan didalam kotak, yang dindingnya berlapis dua; di antara lapis ini diberi air dan es, yang suhunya dijaga konstan yaitu 0 °C. Kenaikan suhu badan hewan, akan menyebabkan es mencair. Karena panas jenis es dan air diketahui, maka dapat diketahui juga jumlah kalori yang diproduksi hewan, berdasar jumlah es yang mencair.

Pengukuran metabolisme energi secara tidak langsung dilakukan berdasar prinsip metabolisme energi secara aerobik yang dipengaruhi oleh jumlah oksigen yang dipakai, dan jumlah karbondioksida yang dibebaskan. Dengan, mengetahui volume oksigen yang dikonsumsi dan karbondioksida yang diproduksi, dapat diketahui jumlah energi metabolisme.

Satuan energi

Karena oksidasi karbon dan hidrogen menghasilkan panas, maka produksi panas dijadikan ukuran metabolisme energi. Satuan panas yang sudah lazim dipakai adalah kalori (calorie). Satu kalori adalah jumlah energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 gram air sebanyak 1 °C. Sebenarnya kebutuhan energi untuk memanaskan air ini bervariasi, tergantung suhu air; ragam ini dapat diabaikan jika kalori dibatasi sebagai kerja, yaitu 1 kalori = 4,1868 joules.

Di dalam perhitungan kebutuhan energi metabolisme, dipakai satuan energi setiap kilogram bobot badan hewan (yaitu kal/g atau kkal/kg). Ada beberapa hal mengenai penggunaan satuan ini: Dalam sistem satuan SI (Systeme International), bobot adalah hasil kali antara massa dengan percepatan gravitasi (9,8067 meter detik⁻²); satuan bobot adalah newton. Dalam pembahasan mengenai energi metabolisme, biasanya massa dianggap sama dengan bobot.

Ada beberapa satuan yang dapat dipakai untuk memperlihatkan energi metabolisme, antara lain kal/massa badan, kal/luas permukaan badan, kal/ massa bebas-lemak, kal/ nitrogen protein, tergantung kebutuhan. Selain kalori, dapat dipakai juga watt, atau joule.

Metabolisme erobik dan anerobik

Di dalam sel, pernafasan atau oksidasi bahan organik berlangsung secara bertahap. Oksidasi sempurna (total oksidasi) bahan organik memang memerlukan oksigen, tetapi masing-masing tahap reaksi kimia, belum tentu memerlukan oksigen. Pada mamalia, ada dua jalur untuk membebaskan energi metabolisme, yang masing-masing menghasilkan ATP. Yang pertama adalah jalur anerobik; energi utamanya berasal dari fermentasi karbohidrat yang menghasilkan asam laktat. Jalur ini disebut juga glikolisis anerobik atau glikolisis, karena yang dioksidasi adalah glikogen.

Jalur lain adalah jalur erobik (memerlukan oksigen) yang akan mengoksidasi bahan organik secara sempurna dan menghasilkan air dan karbondioksida.

Oksidasi (dalam hal ini katabolisme) erobik glikogen menghasilkan ATP 12 kali lebih banyak daripada oksidasi anerobik. Katabolisme erobik dapat berlangsung karena ada sistem pernafasan dan kardiovaskuler, yang menjamin transpor oksigen (yang diperlukan) dan karbondioksida (yang dibuang). Proses erobik, juga bermanfaat untuk menghilangkan asam laktat (hasil proses anerobik) dengan mengoksidasinya menjadi karbondioksida dan air, atau mengubahnya kembali menjadi glikogen atau glukosa, atau menyediakan energi untuk mengekskresikannya dari badan.

Proses anerobik, amat tergantung pada ketersediaan bahan (substrat dan enzim), yaitu glikogen dan enzim glikolitik, di dalam serabut otot. Jika bahan ini tersedia, maka proses anerobik dapat segera menghasilkan energi. Jadi, manfaat proses anerobik adalah jika ada kebutuhan energi yang segera dan di atas kebutuhan energi yang dapat disediakan oleh proses erobik. Banyak kegiatan otot yang memerlukan energi lebih banyak daripada kemampuan oksidasi erobik.

Kontraksi otot dapat berlangsung cukup lama, tanpa menimbulkan kelelahan (fatigue), jika berlangsung secara erobik. Sebaliknya, glikolisis tidak dapat berlangsung lama, karena ia menghasilkan asam laktat yang cepat tertimbun (akumulasi). Asam

laktat bersifat toksik dan karena koefisien difusi asam laktat ini rendah, maka ia terkumpul di darah dan otot yang akan dapat menghambat proses glikolisis selanjutnya. Oleh karena itu, ada kenaikan kebutuhan oksigen setelah proses anerobik. Hal ini disebut hutang oksigen (oxygen debt).

Laju metabolisme basal

Telah diketahui, bahwa metabolisme menghasilkan energi yang dipergunakan untuk memenuhi kebutuhan energi berbagai macam kegiatan. Laju metabolisme ini amat berragam, tergantung pada antara lain suhu lingkungan, aktivitas otot, pencernaan, kualitas pakan, laktasai, kehamilan, berahi, saat dalam sehari, waktu dalam setahun, jenis kelamin, umur, emosi, bentuk badan, dan lain-lain. Sehubungan dengan itu, diperlukan suatu ketentuan tentang laju metabolisme baku (standard metabolic rate, SMR). Baku ini harus mencerminkan produksi energi hewan pada kondisi faali yang minimum. SMR biasanya merupakan tolok ukur laju metabolisme hewan selain mamalia dan burung.

Pada mamalia dewasa, pada keadaan pakan pascaserap (postabsortive), istirahat (tetapi terjaga), dan dalam lingkungan suhu netral (thermal neutral zone) laju produksi energi (kkal per hari) yang minimum dan konstan ini disebut laju metabolisme basal (basal metabolic rate, BMR). Dalam keadaan homeostasis, laju produksi energi ini sama dengan laju penggunaannya. Untuk mengukur BMR tersebut di atas, dapat dipakai perhitungan berdasar kalorimetri (langsung atau tidak langsung).

Pada manusia dan karnivora, keadaan pascaserap dicapai 12 sampai 18 jam setelah makan terakhir. Pada ayam setelah 24 sampai 30 jam. Pada herbivora, waktu ini lebih panjang lagi; anak sapi, misalnya kira-kira setelah 80 jam.

Karena poikilotermia (hewan berdarah dingin) tidak mempunyai zona suhu netral, maka ia tidak mempunyai laju metabolik basal. Untuk hewan selain mamalia dan burung, metabolisme minimum individu pascaserap pada lingkungan tertentu, disebut laju metabolisme baku (standard metabolic rate, SMR).

Ukuran badan

Ragam bobot organisme amat besar, misalnya insek ada yang hanya 2,5 gram sedang ikan paus biru dapat mencapai 120 metrik ton ($1,2 \times 10^8$ gram). Hummingbirds (burung kolibri) hanya 2 gram, tetapi ostriches (burung unta) mencapai 100 kg. Meskipun demikian, ada kesamaan morfologi (struktur) dan faali (fungsi) sel berbagai organisme, kecuali dalam laju metabolismenya.

Ternyata, konsumsi oksigen akan meningkat jika ukuran badan meningkat, yang berarti setiap penambahan massa badan akan menyebabkan penambahan kebutuhan energi metabolisme per massa badan yang sama. Misalnya, kebutuhan oksigen 1 gram jaringan tikus, 20 kali lipat daripada kebutuhan oksigen 1 gram jaringan bison. Jadi, laju metabolisme baku (BMR) per satuan massa badan akan berkurang, jika massa badan bertambah.

Karena ada hubungan antara massa badan dengan ukuran (luas permukaan) badan, maka BMR dapat dinyatakan dalam luas permukaan badan. Untuk memahami hal ini, ada beberapa konsep tentang hubungan antara massa badan dan ukuran (luas permukaan) suatu benda (termasuk organisme), asal bentuknya tetap.

Luas (A) suatu bidang datar akan meningkat sebanyak kuadrat panjangnya (L), jadi $A \Rightarrow L^2$; volume (V) akan meningkat sebanyak pangkat tiga panjangnya atau $V \Rightarrow L^3$. Pada setiap organisme, massa sebanding dengan volume atau $M \Rightarrow V$. Akibatnya, panjang dan luas permukaan dapat dinyatakan sebagai fungsi massa:

$$L \Rightarrow M^{1/3} \text{ atau } L \Rightarrow M^{0,33}$$

$$A \Rightarrow M^{2/3} \text{ atau } A \Rightarrow M^{0,67}$$

Jadi, jika massa hewan diketahui, luas permukaan badannya dapat diduga, sehingga dapat dibuat persamaan

$$Y = aX^b$$

Y adalah luas permukaan badan; a adalah konstanta bagi tiap jenis hewan; X adalah massa badan; dan b adalah pengaruh massa (ukuran) terhadap luas permukaan badan.

Hubungan antara laju metabolisme dengan ukuran badan

Pada mamalia dewasa BMR per luas permukaan badan praktis tetap. Produksi energi per satuan luas permukaan badan antar berbagai hewan lebih seragam (Tabel 13).

Tabel 13. Produksi energi per hari berdasar bobot badan dan luas permukaan badan.

| Hewan | Bobot badan | Produksi panas (kkal per hari) per kg bobot badan | per meter persegi permukaan badan |
|--------------------|-------------|---|-----------------------------------|
| Kuda (habis makan) | 441,0 | 11,3 | 948 |
| Babi (puasa) | 128,0 | 19,1 | 1078 |
| Manusia (puasa) | 64,3 | 32,1 | 1042 |
| Anjing (puasa) | 15,2 | 51,5 | 1039 |
| Kelinci (puasa) | 2,3 | 75,1 | 776 |
| Angsa (puasa) | 3,5 | 66,7 | 1018 |
| Ayam (puasa) | 2,0 | 71,0 | 1008 |

Hewan yang kecil (ringan), permukaan badannya relatif lebih luas daripada hewan yang lebih besar. Lebih cepatnya laju metabolisme hewan yang kecil, adalah karena permukaan yang lebih luas ini. Panas dibuang lewat permukaan badan; semakin luas permukaannya, akan semakin banyak panas yang dibuang, sehingga harus semakin banyak pula produksi panasnya agar suhu badan tidak turun. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa pada mamalia dewasa, BMR sebanding dengan luas permukaan badan. Ini disebut hukum luas permukaan (law of surface area).

Hukum luas permukaan juga berarti, bahwa ada hubungan linear antara BMR dengan luas permukaan. Karena luas permukaan secara geometris adalah volume (atau bobot) pangkat dua pertiga, maka BMR juga sebanding dengan bobot badan pangkat dua pertiga.

Luas permukaan badan dapat dianggap sebagai $S = k \times W^{2/3}$. S adalah luas permukaan badan, W adalah bobot badan (kg), dan k adalah konstanta bagi setiap jenis hewan. Nilai k bervariasi; pada marmot adalah 0,085, sedang pada manusia adalah 0,123.

Secara umum, BMR bagi setiap jenis hewan adalah $Q = 70,5 \times M^{0,734}$; Q adalah produksi panas (kkal) per hari, M adalah bobot badan (kg).

Faktor-faktor laju metabolisme

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi laju metabolisme, antara lain pakan, kerja, suhu lingkungan, dan penyakit.

Pakan. Ada kenaikan produksi panas selama dan sesaat setelah mencerna makanan, yang disebut "specific dynamic effect" (heat increment). Proses kenaikan suhu badan karena pengaruh specific dynamic effect, disebut "specific dynamic action" (SDA).

Jumlah energi specific dynamic effect ini, berbeda-beda antar bahan pakan (karbohidrat, lemak, protein). Energi specific dynamic effect campuran bahan, tidak sama dengan jumlah energi specific dynamic effect masing-masing bahan. SDA sukrosa kira-kira 6%, lemak 13%, dan protein 30% dari kandungan energi total masing-masing.

Heat increment diukur dengan membuat hewan percobaan dalam keadaan pascaserap, lalu produksi panas badannya dihitung. Setelah itu, hewan percobaan diberi pakan yang akan diteliti heat increment-nya, lalu produksi panas badannya dihitung lagi, sampai pakan itu habis (nilai produksi panas badan mencapai keadaan sebelum diberi makan). Selisih antara produksi energi akibat pakan dikurangi produksi energi keadaan pascaserap adalah energi heat increment.

Sebagian besar heat increment ini terbuang sia-sia, kecuali pada musim dingin yang dapat menghangatkan badan. Pada anjing, pakan berupa daging akan meningkatkan laju metabolisme 90% di atas metabolisme basal, karbohidrat akan meningkatkan 20 - 37%, sedang lemak akan meningkatkan 30%.

Penyebab heat increment ini belum jelas, mungkin adalah gerakan peristaltik usus, sekresi, ekskresi, atau deaminasi protein. Kerja. Kerja otot dapat meningkatkan laju metabolisme. Jika tidak ada energi mekanis, maka segala macam produksi energi diubah menjadi panas. Hewan yang berdiri, memerlukan energi yang lebih banyak.

Pada sapi dan domba, kebutuhan energinya 9% di atas kebutuhan jika berbaring; jika amat gemuk, mencapai 13%. Pada kuda, agak berbeda, karena kebutuhan energi untuk berbaring tidak berbeda dengan untuk berdiri. Hal ini terjadi karena susunan anatomi otot, persendian, tendo, dan ligamennya memungkinkan kuda dapat berdiri tanpa produksi energi ekstra.

Efisiensi energi kerja dirumuskan sebagai:

$$\frac{\text{energi kerja (kcal)}}{\text{energi yang ke luar (kcal)}} \times 100$$

Energi yang tidak dipakai untuk kerja, akan ke luar dalam bentuk panas. Efisiensi kerja otot yang maksimum adalah 25% (pada kuda dan manusia).

Berdasar hasil beberapa penelitian, ternyata ada hubungan antara frekuensi denyut jantung dengan aktivitas badan yaitu

$$V_{O_2} = (HR) (SV) (A - V \text{ diff}),$$

V_{O_2} : konsumsi oksigen

HR : frekuensi denyut jantung

SV : volume "stroke"

A-V diff: beda tekanan darah pada pembuluh arteri dan vena.

Suhu lingkungan. Suhu lingkungan, baik di bawah atau di atas titik tertentu, dapat menaikkan produksi energi. Suhu lingkungan, di mana laju metabolisme harus meningkat agar suhu badan hewan

tidak turun, disebut suhu kritis. Suhu kritis ini beragam, antar atau dalam satu spesies. Jika ada kenaikan laju metabolisme di bawah suhu kritis, maka suhu badan hewan akan tetap (konstan).

Di atas suhu kritis, terjadi pembuangan panas badan secara radiasi, konduksi, konvensi, dan evaporasi, agar suhu badan tidak ikut naik. Jika suhu lingkungan ini terus naik, laju metabolisme ikut naik yang akan menyebabkan kenaikan suhu badan.

Suhu lingkungan, di antara suhu kritis dengan suhu di mana laju metabolisme bertambah, disebut zona suhu netral (zone of thermal neutrality). Di zona ini, suhu lingkungan tidak menimbulkan pengaruh yang berarti terhadap laju metabolisme. Pada hewan kecil, zona ini lebih sempit daripada hewan besar.

Penyakit. Pada keadaan hipertiroidisme, metabolisme basal cenderung naik, begitu juga leukemia. Pada keadaan demam, laju metabolisme naik karena berlaku hukum van't Hoff.

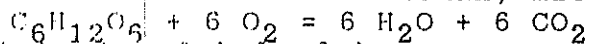
Koefisien nafas. Koefisien nafas (respiratory quotient, RQ) adalah nisbah antara CO₂ yang diproduksi dengan O₂ yang dipakai atau

$$RQ = \frac{\text{volume CO}_2}{\text{volume O}_2}$$

Jika RQ diketahui, maka dapat diketahui juga bagian (proporsi) karbohidrat dan lemak badan yang dioksidasi, serta kalori yang diproduksi. Rata-rata RQ karbohidrat adalah 1,0; protein 0,8, sedang lemak 0,71. Oksidasi 1 gram karbohidrat campuran menghasilkan 4,1 kkal, oksidasi 1 gram lemak menghasilkan kira-kira 9,3 kkal, sedang oksidasi 1 gram protein menghasilkan kira-kira 4,5 kkal.

Karena yang dioksidasi oleh badan adalah beberapa macam jaringan sekaligus, maka sebenarnya tidak tepat untuk mengukur produksi energi hanya berdasar RQ. Untuk mengukur protein yang dimetabolisme, misalnya, harus diukur juga jumlah nitrogen yang sisa (terbuang), misalnya dalam bentuk urea, asam urat, atau amonia. Jika energi yang berasal dari protein dapat diketahui, maka jumlah karbohidrat dan lemak yang dipergunakan tubuh dapat diduga lebih tepat.

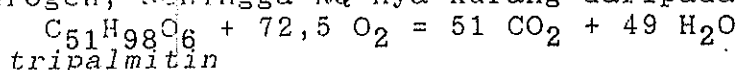
Gas dalam jumlah (volume), suhu dan tekanan yang sama mengandung jumlah molekul yang sama pula, sehingga jumlah molekul yang terbentuk setara dengan volume produksi. Sebagai contoh, oksidasi karbohidrat dan lemak, misalnya glukosa dan tripalmitin,



Di sini, 1 molekul glukosa mempergunakan 6 molekul oksigen, dan menghasilkan 6 molekul air dan 6 molekul karbondioksida. Karena jumlah molekul setara dengan volume, maka RQ = 6 volume CO₂ / 6 volume O₂ = 1.

Pada oksidasi glukosa, oksigen dipakai untuk mengoksidasi karbon; volume karbondioksida yang dibuang sama dengan volume oksigen yang dipakai, sehingga RQ-nya adalah 1.

Pada oksidasi lemak, seperti tripalmitin, sebagian oksigen dipakai untuk mengoksidasi karbon, dan sebagian lagi mengoksidasi hidrogen, sehingga RQ-nya kurang daripada 1, yaitu 0,703.



Oksidasi 1 molekul tripalmitin memerlukan 72,5 molekul O₂, serta menghasilkan 49 molekul H₂O dan 51 molekul CO₂. Karena itu RQ = 51 volume CO₂ / 72,5 volume O₂ = 0,703.

Pada Tabel 14 berikut disajikan tabel nilai kalori hasil oksidasi campuran karbohidrat dengan lemak. Dengan mempergunakan Tabel 13 tersebut, dapat dihitung jumlah energi hasil oksidasi jaringan atau macam jaringan yang dioksidasi.

Sebagai contoh, ayam yang dipuasakan 4 jam, mengkonsumsi 5,58 liter oksigen dan memproduksi 3,97 liter karbondiosida, sehingga $RQ = 3,97 / 5,58 = 0,71$. Berdasar Tabel 5, jika $RQ = 0,71$, seliter oksigen ekuivalen dengan 4,69 kalori. Jadi, produksi panas total = $5,58 \times 4,69 = 26,17$ kkal.

Berdasar tabel juga tampak, bahwa jika $RQ = 0,71$, persentase panas dari oksidasi karbohidrat adalah 1,10 persen dan dari oksidasi lemak adalah 98,9 persen, sehingga

kalori dari karbohidrat = $0,011 \times 26,17 = 0,290$ kkal

kalori dari lemak = $0,989 \times 26,17 = 25,880$ kkal

Jadi, karbohidrat yang dioksidasi $0,29 / 4,1$ gram = 0,07 gram, sedang lemak yang dioksidasi = $25,88 / 9,3$ gram = 2,78 gram.

Tabel 14. Oksidasi campuran karbohidrat dan lemak badan

| RQ | Persentase panas total yang berasal dari karbohidrat | Persentase panas total yang berasal dari lemak | Kalori per liter oksigen |
|------|--|--|-----------------------------|
| 0,70 | 0 | 100,00 | 4,686 |
| 0,71 | 1,10 | 98,90 | 4,690 |
| 0,72 | 4,76 | 95,20 | 4,702 |
| 0,73 | 8,40 | 91,60 | 4,714 |
| 0,74 | 12,00 | 88,00 | 4,727 |
| 0,75 | 15,60 | 84,40 | 4,739 |
| 0,76 | 19,20 | 80,80 | 4,751 |
| 0,77 | 22,80 | 77,20 | 4,764 |
| 0,78 | 26,30 | 73,70 | 4,776 |
| 0,79 | 29,90 | 70,10 | 4,788 |
| 0,80 | 33,40 | 66,60 | 4,801 |
| 0,81 | 36,90 | 63,10 | 4,813 |
| 0,82 | 40,30 | 59,70 | 4,825 |
| 0,83 | 43,80 | 56,20 | 4,838 |
| 0,84 | 47,20 | 52,80 | 4,850 |
| 0,85 | 50,70 | 49,30 | 4,862 |
| 0,86 | 54,10 | 45,90 | 4,875 |
| 0,87 | 57,50 | 42,50 | 4,887 |
| 0,88 | 60,80 | 39,20 | 4,899 |
| 0,89 | 64,20 | 35,80 | 4,911 |
| 0,90 | 67,50 | 32,50 | 4,924 |
| 0,91 | 70,80 | 29,20 | 4,936 |
| 0,92 | 74,10 | 25,90 | 4,948 |
| 0,93 | 77,40 | 22,60 | 4,961 |
| 0,94 | 80,70 | 19,30 | 4,973 |
| 0,95 | 84,00 | 16,00 | 4,985 |
| 0,96 | 87,20 | 12,80 | 4,998 |
| 0,97 | 90,40 | 9,58 | 5,010 |
| 0,98 | 93,60 | 6,37 | 5,022 |
| 0,99 | 96,80 | 3,18 | 5,035 |
| 1,00 | 100,00 | 0,00 | 5,047 |

Pada metabolisme normal, sebagian energi berasal dari oksidasi karbohidrat, lemak, atau protein. Seperti telah dikemukakan, energi hasil metabolisme karbohidrat dan lemak, mudah dipertanggungjawabkan dengan memakai kalorimetri, seperti uraian di atas. Tetapi, metabolisme protein agak berbeda.

Pada oksidasi protein, 0,966 liter oksigen menghasilkan 0,774 liter karbondioksida, sehingga RQ protein adalah $0,774/0,966 = 0,801$. Jumlah protein yang dimetabolisme adalah $(N \times 6,25)$ yang ekuivalen dengan $(N \text{ urine gram} \times 26,51 \text{ kkal})$, produksi karbondioksida $(\text{gram N urine} \times 4,76 \text{ liter})$ dan konsumsi oksigen $(\text{gram N urine} \times 5,94 \text{ liter})$. Lalu, dengan memperhitungkan konsumsi oksigen total, produksi karbondioksida total yang berasal dari protein, dan RQ nonprotein dapat dihitung. Karena itu, untuk mengoreksi perhitungan dengan kalorimetri, kandungan nitrogen dalam urine harus diperhitungkan juga.

Nilai RQ tidak tergantung pada jenis hewan, tetapi tergantung pada jenis pakan atau jaringan badan yang dioksidasi. Hewan yang dipuaskan, nilai RQ-nya mendekati 0,7, yang berarti jaringan yang dioksidasi adalah lemak.

Tabel 15. Pengaruh puasa terhadap RQ

| Domba | | Ayam | |
|--|------|--|------|
| Lama puasa setelah pemberian pakan (jam) | RQ | Lama puasa setelah pemberian pakan (jam) | RQ |
| 0 - 10 | 0,90 | 1 - 5 | 0,96 |
| 24 - 34 | 0,76 | 22 - 29 | 0,74 |
| 48 - 58 | 0,72 | 48 - 53 | 0,70 |
| | | 72 - 78 | 0,71 |
| | | 88 - 101 | 0,71 |

Kadang-kadang, nilai RQ lebih daripada 1 karena ada transformasi karbohidrat (yang kaya-oksigen) menjadi lemak (yang miskin-oksigen). Sebagai contoh, konversi glukosa menjadi asam stearat: $3 \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = \text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2 + 8 \text{ O}_2$, oksigen yang dilepaskan dipakai untuk melangsungkan proses oksidasi, sehingga hanya sedikit oksigen (hanya 1 molekul) dari udara (lewat pernafasan) yang dipergunakan badan.

Pada herbivora, khususnya ruminansia, RQ juga dipengaruhi oleh karbondioksida yang berasal dari fermentasi yang berlangsung di dalam alat pencernaan.

Berdasar pakan alamiahnya, nilai RQ herbivora biasanya tinggi, omnivora sedang, dan karnivora rendah.

Latihan

1. Beri uraian tentang:
 - a. gross income of energy
 - b. net income of energy
 - c. combustible gases
 - d. gas metan.
 - e. heat increment

- f. calorogenic effect
 - g. satuan energi
 - h. hutang oksigen
 - i. hukum luas permukaan
 - j. suhu kritis
 - k. zona suhu netral
 - l. Efisiensi energi
2. Sebut beberapa tahap yang harus ditempuh sebelum terjadi pernafasan tingkat sel
 3. Bagaimana cara mengukur energi metabolisme
 4. Laju metabolisme basal
 - a. arti
 - b. faktor ?
 - c. cara mengukur
 5. Apa hubungan antara metabolisme dengan ukuran badan
 6. Koefisien nafas
 - a. arti
 - b. dipakai untuk mengukur apa ?

DAFTAR PUSTAKA

- F.G. Winarno, dan S. Fardiaz. 1979. Biofermentasi dan Biosintesa Protein, Penerbit Angkasa, Bandung.
- de Robertis, E.D.P., W.W. Nowinski, dan F.A. Saes. 1970. Cell Biology. WB Saunders Co., Philadelphia-London-Toronto.
- Hole, C.B. 1979. An Introduction to Cell Biology. English Language Book Society and MacMillan Education.

M E T A B O L I S M E

Ada dua macam metabolisme, yaitu anabolisme dan katabolisme. Anabolisme adalah proses penyusunan bahan organik, sedang katabolisme adalah proses penguraian bahan organik dan ada pembebasan energi. Jika anabolisme lebih besar daripada katabolisme terjadilah pertumbuhan.

Metabolisme Umum.

Metabolisme umum meliputi perubahan energi total pada suatu sel atau organisme. Transformasi energi dari bahan organik dipengaruhi oleh beberapa mekanisme biokimiawi, seperti kloroplast, mitokondria dan sebagainya.

Basal metabolisme adalah energi minimum yang dibutuhkan untuk menjamin aktivitas kehidupan yang normal. Laju metabolik (metabolic rate) biasanya dinyatakan dalam kalori per kilogram bobot badan per jam.

Metabolisme Khusus.

Metabolisme khusus meliputi rantai reaksi kimia yang terjadi pada bahan atau kelompok bahan tertentu, misalnya glikogen, protein, nitrogen dan sebagainya.

METABOLISME PROTEIN.*** Protein dalam makanan dipecah oleh enzim dalam alat pencernaan menjadi asam-asam amino. Asam amino diserap oleh aliran darah dibawa ke bagian-bagian tubuh untuk menyusun jaringan tubuh. Asam amino yang berlebih tidak dipakai melainkan dibuang dalam bentuk nitrogen.

Kelebihan asam-asam amino yang tidak dipakai tubuh akan dipecah menjadi:

- 1) Bagian non nitrogen yang akan mengalami siklus Krebs dan dioksidasi menjadi CO_2 dan H_2O atau diubah menjadi lemak tubuh.
- 2) Bagian nitrogen yang akan menjadi urea dan diekskresi dalam bentuk urine.

Kelebihan asam amino akan terkumpul di hati dan mengalami deaminasi. Deaminasi adalah proses pemisahan grup karboksil ($COOH$) dari grup amino (NH_2), yang lalu dengan karbondioksida membentuk urea. Urea dari hati ini, akan dibawa ke organ ekskresi untuk dibuang melalui urine. Pembentukan urea ini disebut siklus ornithine. Pembentukan urea dalam hati termasuk urea eksogen dan yang dibentuk dalam jaringan lain disebut urea endogen.

Anabolisme protein meliputi semua perubahan dalam pembentukan asam amino dan penggunaannya oleh tubuh. Sedang katabolisme protein meliputi semua perubahan dalam penguraian yang dialami oleh molekul asam amino untuk membentuk urea.

METABOLISME KARBOHIDRAT.*** Hasil akhir pencernaan karbohidrat adalah glukosa, yang oleh villi usus akan diserap dan memasuki peredaran darah. Jika kadar glukosa darah lebih dari normal, maka kelebihan glukosa akan disimpan di hati dan diubah menjadi glikogen (proses anabolisme karbohidrat).

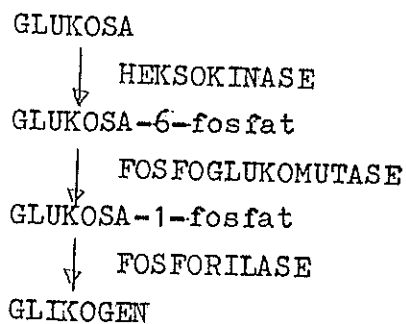
Dalam jaringan tubuh, glukosa dioksidasi menjadi CO_2, H_2O dan energi (proses katabolisme).

Ada tiga proses penting dalam metabolisme karbohidrat, yaitu: 1. Glikogenesis (pembentukan glikogen dari glukosa), yang dilakukan oleh sel hati.

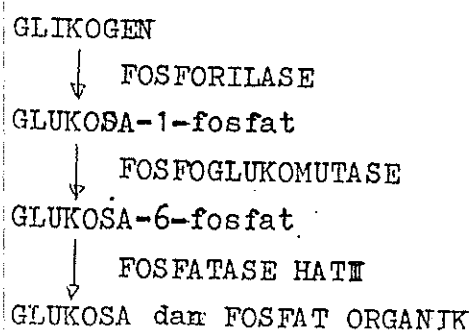
2. Glikogenolisis (perubahan glikogen menjadi glukosa).

3. Glikolisis (penguraian glikogen menjadi asam laktat).

* GLIKOGENESIS — Glikogenesis adalah sintesis glikogen, terutama dari glukosa, fruktosa dan galaktosa. Proses glikogenesis berlangsung secara bertahap, dengan bantuan enzim.

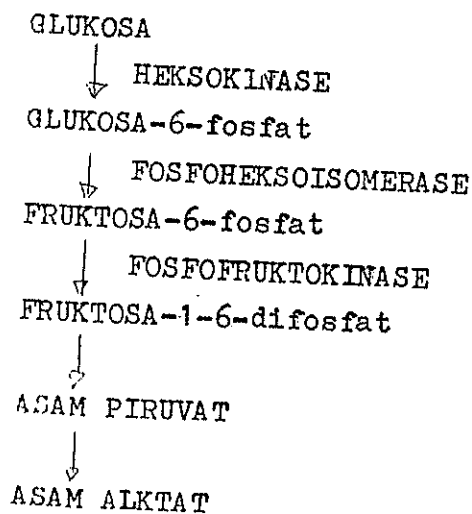


* GLIKOGENOLISIS — Jika glukosa darah dibawah normal, glikogen diubah lagi menjadi glukosa, yang berlangsung di hati.



Agar kadar glukose darah selalu tetap, diperlukan pengatur an oleh hormon, misalnya insulin yang diproduksi oleh pulau-pulau Langerhans pankreas. Jika glukose naik, hati akan dipengaruhi oleh insulin untuk melaksanakan glikogenesis. Sebaliknya, perubahan glikogen menjadi glukosa dikontrol oleh hormon diabetogenik yang diproduksi oleh pituitrin anterior.

* GLIKOLISIS — Prubahan glukosa menjadi asam laktat serta CO_2 dan H_2O disebut glikolisis.



Perubahan asam piruvat menjadi asam laktat, berlangsung anaerobik di otot.

METABOLISME LEMAK.*** Pada vertebrata, lemak ditimbun dalam jaringan lemak. Saat dicerna, lemak diubah menjadi asam lemak dan gliserol, diserap oleh saluran lakteal, lalu masuk aliran darah melalui duktus limphe.

Pada proses metabolisme lemak, asam lemak dan gliserol di oksidasi dan menghasilkan CO_2 dan H_2O , yang dibuang melalui paru-paru dan kulit.