

MODUL  
BAHAN AJAR CETAK  
FARMASI

# PRAKTIKUM KIMIA FARMASI



» Mimin Kusmiyati



**Pusdik SDM Kesehatan**  
Badan Pengembangan dan Pemberdayaan  
Sumber Daya Manusia Kesehatan

Jl. Hang Jebat III Blok F3, Kebayoran Baru Jakarta Selatan - 12120  
**Telp.** 021 726 0401, **Fax.** 021 726 0485, **Email.** pusdiknakes@yahoo.com

**PRAKTIKUM  
KIMIA FARMASI**



**KEMENTERIAN KESEHATAN REPUBLIK INDONESIA**  
PUSAT PENDIDIKAN SUMBER DAYA MANUSIA KESEHATAN  
BADAN PENGEMBANGAN DAN PEMBERDAYAAN SUMBER DAYA MANUSIA KESEHATAN



MODUL  
BAHAN AJAR CETAK  
FARMASI

# PRAKTIKUM KIMIA FARMASI

» Mimin Kusmiyati



**KEMENTERIAN KESEHATAN REPUBLIK INDONESIA**

PUSAT PENDIDIKAN SUMBER DAYA MANUSIA KESEHATAN

BADAN PENGEMBANGAN DAN PEMBERDAYAAN SUMBER DAYA MANUSIA KESEHATAN

Hak Cipta © dan Hak Penerbitan dilindungi Undang-undang

Cetakan pertama, Desember 2016

*Penulis* : *Dra. Mimin Kusmiyati, M.Si*

*Pengembang Desain Instruksional* : *Drh. Ida Malati Sadjati, M.Ed.*

*Desain oleh Tim P2M2 :*

*Kover & Ilustrasi* : *Faisal Zamil*

*Tata Letak* : *Adang Sutisna*

Jumlah Halaman : 230

## DAFTAR ISI

<b>BAB I: SEL DAN SENYAWA-SENYAWA KIMIA SEBAGAI DASAR KEHIDUPAN</b>	<b>1</b>
<b>Topik 1.</b>	
<b>S e l</b> .....	<b>3</b>
Latihan .....	17
Ringkasan .....	18
Tes 1 .....	18
<b>Topik 2.</b>	
<b>Senyawa Kimia sebagai Dasar Kehidupan</b> .....	<b>21</b>
Latihan .....	28
Ringkasan .....	28
Tes 2 .....	29
<b>KUNCI JAWABAN TES</b> .....	<b>31</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>32</b>
<b>BAB II: KARBOHIDRAT</b>	<b>33</b>
<b>Topik 1.</b>	
<b>Karbohidrat</b> .....	<b>35</b>
Latihan .....	50
Ringkasan .....	50
Tes 1 .....	51
<b>Topik 2.</b>	
<b>Metabolisme Karbohidrat</b> .....	<b>53</b>
Latihan .....	66
Ringkasan .....	67
Tes 2 .....	67
<b>KUNCI JAWABAN TES</b> .....	<b>70</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>71</b>

<b>BAB III: PROTEIN</b>	<b>72</b>
<b>Topik 1.</b>	
<b>Protein</b> .....	<b>73</b>
Latihan .....	86
Ringkasan .....	89
Tes 1 .....	89
<b>Topik 2.</b>	
<b>Metabolisme Asam Amino</b> .....	<b>92</b>
Latihan .....	103
Ringkasan .....	103
Tes 2 .....	104
<b>KUNCI JAWABAN TES</b> .....	<b>107</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>112</b>
<b>BAB IV: LIPID</b>	<b>113</b>
<b>Praktik 1.</b>	
<b>Lemak</b> .....	<b>114</b>
Latihan .....	125
Ringkasan .....	126
Tes 1 .....	127
<b>Praktik 2.</b>	
<b>Metabolisme Lemak</b> .....	<b>129</b>
Latihan .....	130
Ringkasan .....	141
Tes 2 .....	141
<b>KUNCI JAWABAN TES</b> .....	<b>144</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>148</b>
<b>BAB V: ENZIM</b>	<b>149</b>
<b>Praktik 1.</b>	
<b>Enzim</b> .....	<b>152</b>
Latihan .....	175
Ringkasan .....	177
Tes 1 .....	177

<b>Praktik 2.</b>	
<b>Peranan Enzim dalam Proses Metabolisme .....</b>	<b>180</b>
Ringkasan .....	186
Tes 2 .....	186
<b>KUNCI JAWABAN TES .....</b>	<b>189</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>191</b>
<b>BAB VI: VITAMIN DAN MINERAL</b>	<b>192</b>
<b>Praktik 1.</b>	
<b>V i t a m i n .....</b>	<b>194</b>
Latihan .....	209
Ringkasan .....	210
Tes 1 .....	211
<b>Praktik 2.</b>	
<b>M i n e r a l .....</b>	<b>213</b>
Latihan .....	221
Ringkasan .....	222
Tes 2 .....	223
<b>KUNCI JAWABAN TES .....</b>	<b>225</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>228</b>

# **BAB I**

## **SEL DAN SENYAWA-SENYAWA KIMIA SEBAGAI DASAR KEHIDUPAN**

*Dra. Mimin Kusmiyati, M.Si.*

### **PENDAHULUAN**

Sel adalah unit terkecil dari suatu sistem kehidupan, unit structural, dan fungsional dasar penyusun makhluk hidup. Setiap sel tersusun oleh membran sel dan sitoplasma yang berisi organel-organel sel.

Menurut teori sel, semua makhluk hidup tersusun oleh satu atau lebih sel. Semua sel berasal dari sel yang sudah ada sebelumnya. Semua fungsi vital organisme berlangsung di dalam sel dan semua sel mengandung informasi genetik yang diperlukan untuk menjalankan dan mengendalikan semua fungsi sel dan untuk menurunkan informasi genetik dari satu generasi ke generasi berikutnya.

Berdasarkan jumlah sel penyusunnya, makhluk hidup dapat dibedakan menjadi makhluk uniseluler dan multiseluler. Makhluk uniseluler adalah makhluk yang tubuhnya hanya tersusun oleh satu sel, misalnya bakteri, ganggang hijau serta beberapa jenis protozoa dan jamur mikroskopik. Makhluk multiseluler adalah makhluk yang tubuhnya tersusun dari lebih satu sel, misalnya jamur, tumbuhan, hewan dan manusia.

Bab 1 ini berisi penjelasan tentang sel dan senyawa-senyawa kimia sebagai dasar kehidupan. Hal pertama yang akan dijelaskan adalah struktur sel dan fungsi bagian-bagian sel. Dengan mempelajari sel dan bagian-bagiannya diharapkan Anda dapat memahami bahwa proses biokimia berlangsung di dalam sel karena sel berisi berbagai jenis molekul penyusun tubuh makhluk hidup.

Secara umum, setelah mempelajari bab 1 ini, Anda diharapkan dapat menjelaskan struktur sel dan fungsi bagian-bagian sel serta senyawa-senyawa kimia penyusun makhluk hidup. Secara rinci, dengan mempelajari materi dalam bab 1 ini, Anda diharapkan dapat:

1. Menyebutkan struktur dan fungsi sel.
2. Menjelaskan jenis, ukuran, dan komponen kimia penyusun sel.
3. Menjelaskan struktur sel eukariota.
4. Menjelaskan struktur prokariota.
5. Menjelaskan tentang organel-organel sel dan fungsinya.

Untuk memfasilitasi proses belajar mandiri Anda, maka materi dalam bab 1 ini dikemas dalam 2 (dua) topik, yaitu:

- Topik 1. Sel
- Topik 2. Senyawa Kimia Sebagai Dasar Kehidupan

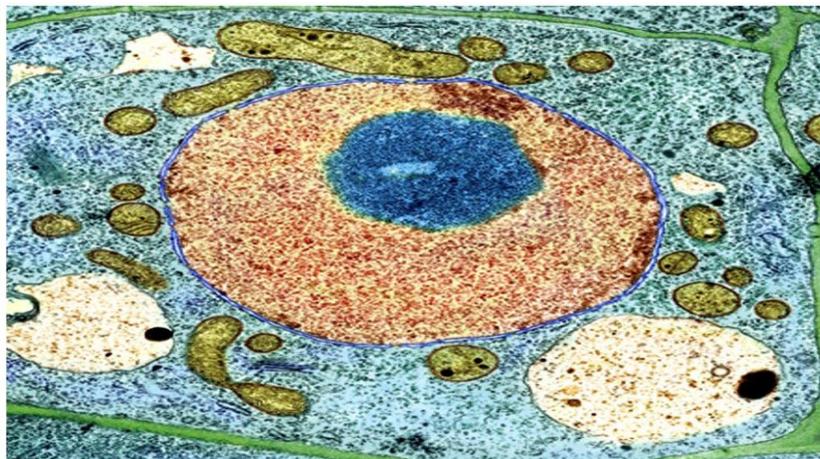
## ✂ ■ Biokimia ✂ ■

Pemahaman Anda tentang sel ini akan lebih jelas dan lengkap jika sebelumnya Anda sudah menguasai materi tentang biologi sel. Selanjutnya, materi yang Anda pelajari pada bab 1 ini akan berguna bagi Anda terutama ketika Anda belajar tentang mata kuliah biokimia dengan tahapan dari mulai sel, karbohidrat, protein, lipid, enzim, vitamin dan mineral.

## Topik 1 Sel

Sel penyusun makhluk hidup jika dilihat dari tingkat evolusinya terbagi ke dalam dua kelompok besar yaitu sel prokariota dan sel eukariota. Perbedaan utamanya adalah pada inti sel sejati, yaitu materi genetik yang tersimpan dalam satu struktur inti sel yang memiliki membran. Sel memiliki jenis, ukuran, komponen kimia, struktur, dan kegunaan dari organel-organelnya dalam mendukung proses metabolisme di dalam tubuh makhluk hidup.

Sel adalah bagian terkecil dari suatu sistem kehidupan, hal ini terlihat pada gambar berikut ini :



*Gambar 1.1 Sel*

Sel juga merupakan satu unit dasar dari tubuh manusia di mana setiap organ merupakan gregasi/ penyatuan dari berbagai macam sel yang dipersatukan satu sama lain oleh sokongan struktur-struktur interselluler. Setiap jenis sel dikhususkan untuk melakukan suatu fungsi tertentu. Misalnya sel darah merah yang jumlahnya 25 triliun berfungsi untuk mengangkut oksigen dari paru-paru ke jaringan. Di samping sel darah merah masih terdapat sekitar 75 triliun sel lain yang menyusun tubuh manusia, sehingga jumlah sel pada manusia sekitar 100 triliun sel.

### **A. PERKEMBANGAN TEORI SEL**

Sel pertama kali ditemukan oleh Robert Hooke (1635—1705) pada sel-sel irisan gabus yang berbentuk „kamar-kamar kecil“ seperti penjara sehingga disebut “cella” (kamar kecil). Sejak ditemukan mikroskop oleh Anthony van Leewenhoek penelitian tentang sel berkembang sangat pesat. Menjelang abad 20 banyak ditemukan berbagai struktur atau bentukan di dalam sel. Beberapa ahli yang meneliti tentang sel di antaranya:

1. Schleiden (1840—1891) dan Schwann (1810—1882) yang menyatakan bahwa makhluk hidup terdiri atas sel-sel. Sel merupakan unit struktural makhluk hidup.
2. Robert Brown (1813) menemukan nukleus dan menyatakan bahwa nukleus merupakan bagian yang penting dari sel.
3. Felix Dujardin (1835), menyatakan bahwa bagian yang penting adalah cairan sel.
4. Johannes Purkinje (1787—1869) menemukan bahwa cairan sel adalah protoplasma.
5. Max Schultze (1825—1874) menyatakan bahwa protoplasma merupakan dasar fisik kehidupan dan sel merupakan unit fungsional dari kehidupan.
7. Rudolf Virchow (1858) menyatakan “*omne cellula ex cellulae*”, artinya sel berasal dari sel sebelumnya.

Secara singkat sel adalah kesatuan struktural, fungsional, dan hereditas yang terkecil; semua organisme, tumbuhan, hewan, dan mikrobia terdiri dari sejumlah sel dengan sekresinya; sel hanya berasal dari sel sebelumnya, setiap sel memiliki kehidupannya sendiri di samping peranan gabungan di dalam organisme multisel.

## **B. KARAKTERISTIK SEL**

### **1. Sel sangat kompleks dan terorganisasi**

Kompleksitas sel sangat nyata tetapi sulit dijelaskan. Kompleksitas sel dapat dianalogikan dengan keteraturan dan konsistensi keteraturan dan konsistensi sel dapat dilihat dari organel-organel sel yang mempunyai struktur sendiri-sendiri dan adanya interaksi antar bagian sel ataupun antar organel yang berperan untuk memelihara ataupun operasional sistem sel.

Terorganisir merupakan karakteristik sel; dapat dilihat pada proses sintesis protein, proses pembentukan energi kimia, pembentukan membran sel. Pada proses tersebut terdapat kerja sama antar organel sel dan semua proses sangat terorganisir.

### **2. Sel mempunyai program genetik**

Organisme dibangun berdasarkan informasi yang dikode dalam gen-gen. Gen bukanlah sekedar tempat menyimpan informasi tetapi juga mengandung *blueprint* (cetakan) untuk membentuk struktur sel dan mengatur aktivitas sel.

### **3. Sel membentuk dan menggunakan energi**

Perkembangan dan pemeliharaan sel membutuhkan masukan energi yang konstan. Energi cahaya diserap oleh pigmen fotosintetik yang terdapat pada sel, kemudian cahaya tersebut akan dikonversi menjadi energi kimia. Pada hewan energi telah dikemas berupa glukosa, pada manusia glukosa dilepaskan oleh hati ke aliran darah.

### **4. Sel mampu menghasilkan berbagai macam reaksi kimia**

Reaksi kimia yang terjadi di dalam sel sering disebut metabolisme. Metabolisme adalah suatu proses perubahan molekul- molekul kompleks menjadi molekul-molekul kecil atau sebaliknya.

**5. Sel mampu melakukan aktivitas mekanik**

Sel adalah tempat aktivitas mekanik, di mana bahan atau molekul diangkut dari satu tempat ke tempat lain, baik di dalam sel atau antar sel.

**6. Sel mampu merespon stimulus**

Pada sel protista misalnya bakteri mampu bergerak ke arah sumber nutrisi.

Pada organisme multiseluler umumnya respon stimuli ditangkap oleh reseptor yang akan berinteraksi dengan substansi yang terdapat dalam lingkungan.

**7. Sel mampu mengatur diri**

Kebutuhan akan energi, pemeliharaan dan keadaan sel yang stabil membutuhkan pengaturan yang konstan. Dalam hal ini sel mempunyai kemampuan yang sangat baik.

**8. Sel mampu membelah diri**

Individu-individu baru dihasilkan melalui proses reproduksi. Sel dihasilkan melalui proses pembelahan sel di mana satu sel induk akan menghasilkan dua sel anak. Dari proses ini sifat-sifat yang dimiliki induk akan diwariskan ke keturunannya.

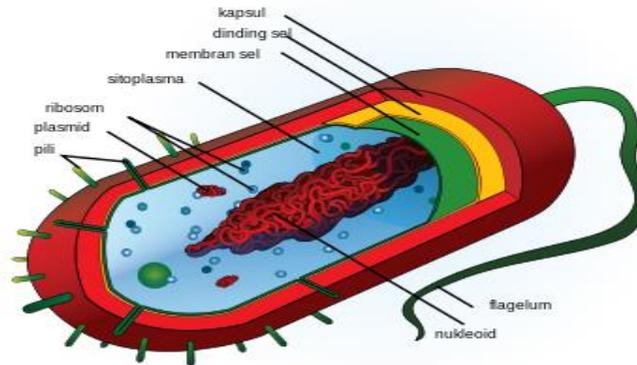
Dengan mempelajari sel banyak manfaat yang dapat diambil, di antaranya memahami mekanisme kerja sel yang berguna sebagai bahan pertimbangan dalam mematikan sel lain yang berbahaya atau patogen, dapat mengembangkan organisme unggul yang sangat penting bagi manusia, misalnya untuk sumber antibiotika atau obat-obatan yang lain, atau sumber pangan baru.

## **C. STRUKTUR UMUM SEL**

Organisme yang hidup sekarang berasal dari satu sel induk yang ada pada berjuta-juta tahun yang silam. Sel induk ini secara bertahap dan pelan-pelan berubah untuk dapat menyesuaikan diri dengan lingkungannya, agar supaya dapat melangsungkan hidupnya.

Perubahan struktural dan fungsional ini menimbulkan dua kelompok besar yang sekarang kita kenal dengan kelompok sel prokaryot dan eukaryot. Dua kelompok sel tersebut berbeda dalam ukuran dan struktur internalnya atau organel-organel yang terkandung di dalamnya. Dari segi evolusi maka kelompok prokaryot merupakan kelompok dengan struktur yang lebih sederhana dan ditemukan hanya pada bakteri dan semua bakteri adalah sel prokaryot. Sementara organisme lainnya seperti protista, fungi, tumbuhan dan hewan- merupakan struktur yang lebih kompleks, termasuk kedalam kelompok sel eukaryot.

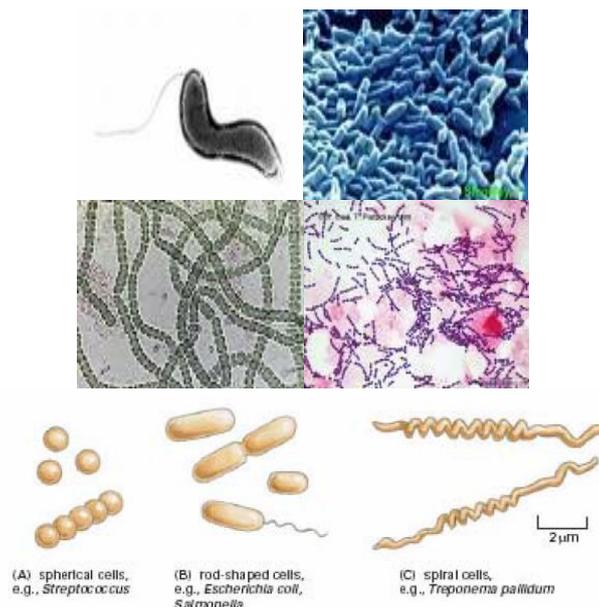
## 1. Sel Prokariot



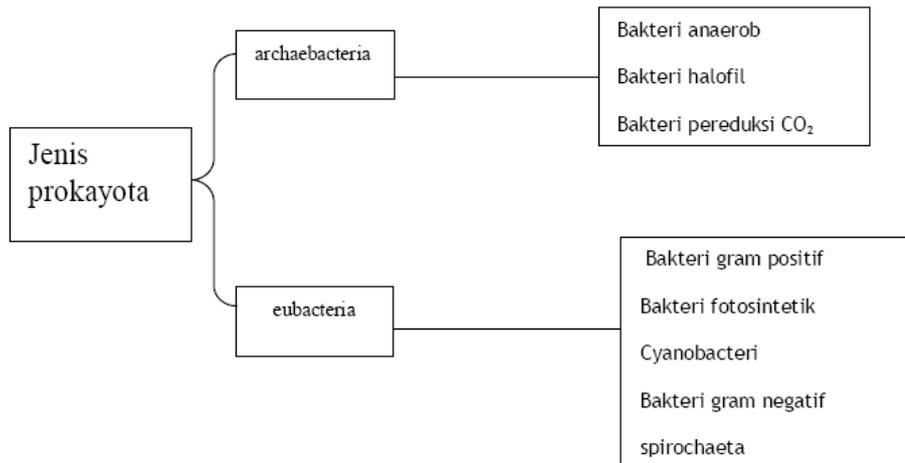
Gambar 1.2 Bakteri

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

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

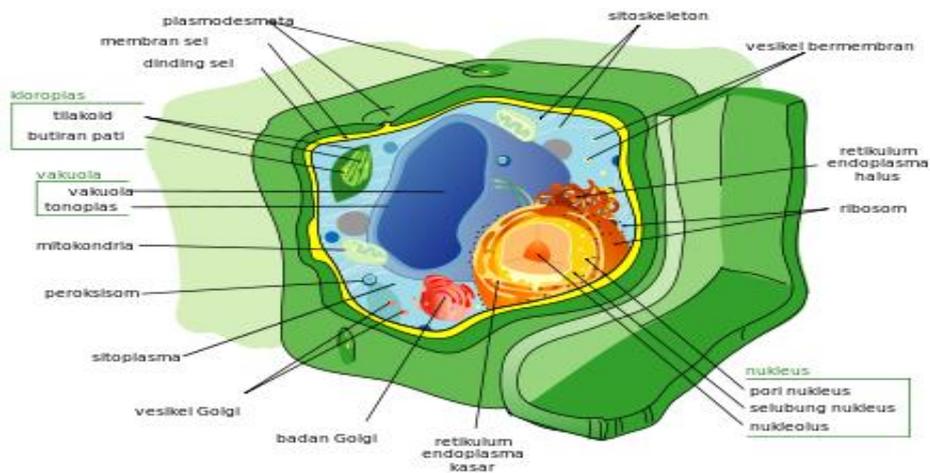


Gambar 1.3. Bentuk Bakteri

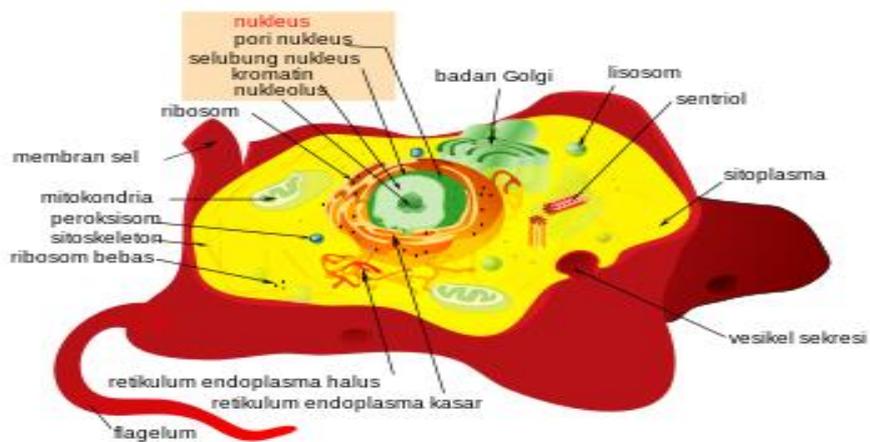


Tabel 1.1 Jenis Prokariot

## 2. Sel Eukariot



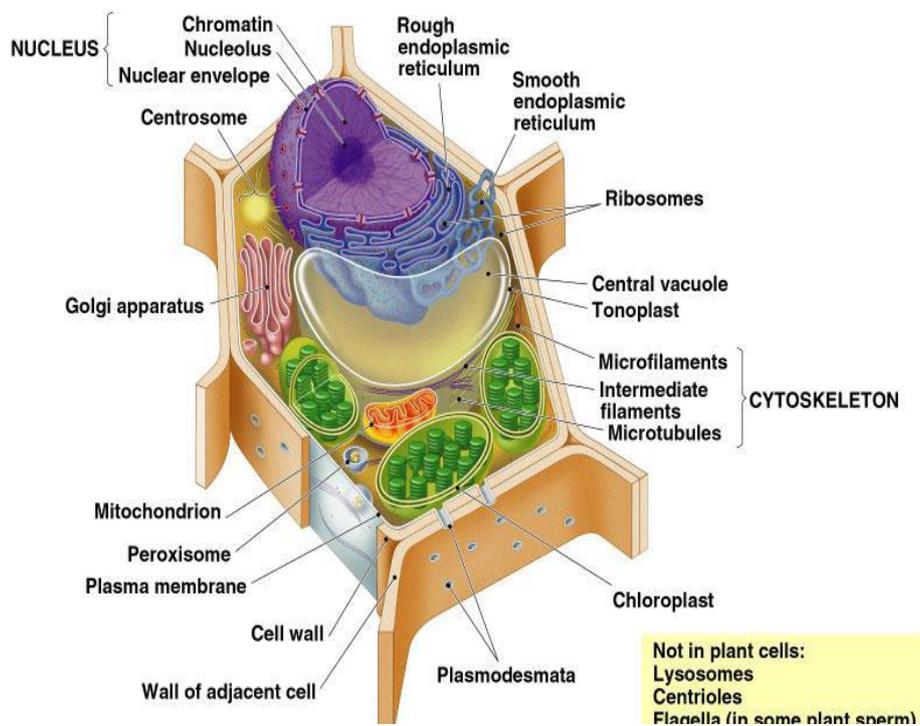
Gambar 1.4. Gambaran umum sel tumbuhan



Gambar 1.4.1 Gambaran Umum Sel Hewan

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

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



Karakteristik yang ada di sel eukaryota tetapi tidak di ada di sel prokaryota

- a. pembelahan sel pada saat membentuk nukleus dan sitoplasma, dipisahkan oleh selubung nuklear yang mengandung struktur pori kompleks

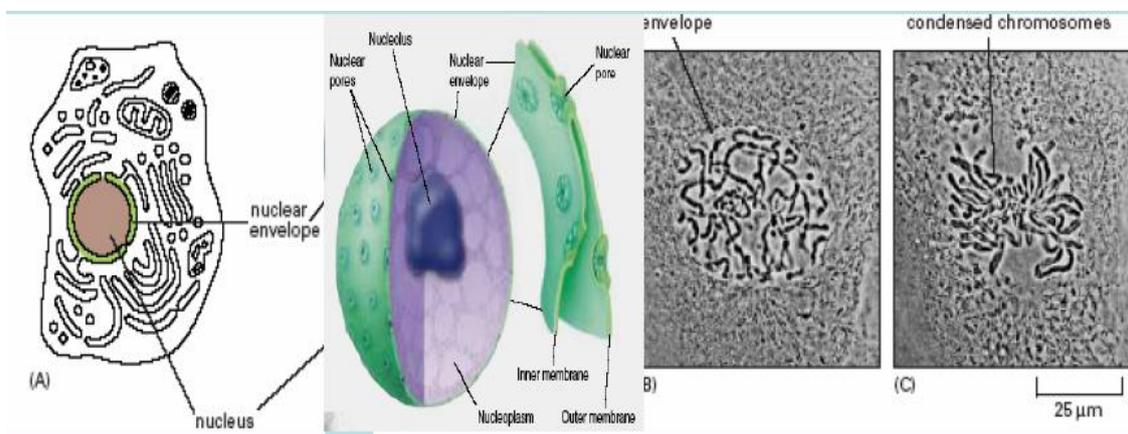
- b. kompleks kromosom tersusun oleh DNA dan gabungan protein yang mampu memadat menjadi struktur mitotik
- c. mempunyai kelompok organel membran sitoplasmik (termasuk RE, golgi, lisosom, ensosom, peoksisom, dan glioksisom)
- d. mempunyai organel sitoplasmik yang khusus untuk respirasi aerob (mitokondria) dan untuk fotosintesis (kloroplas)
- e. mempunyai sistem sitoskelet yang kompleks termasuk mikrofilamen, filamen intermedia, dan mikrotubul
- f. mempunyai flagel dan cilia
- g. mampu memasukkan cairan atau partikel melalui penyelubungan berupa vesikel membran plasma (endositosis dan fagositosis)
- h. dinding sel mengandung selulosa (pada tumbuhan)
- i. pembelahan sel melibatkan peranan mikrotubula sebagai gelendong mitotik pada pemisahan kromosom
- j. terdapat dua kopian gen per sel (diploid), masing-masing berasal dari induknya. reproduksi seksual membutuhkan meiosis dan fertilisasi.

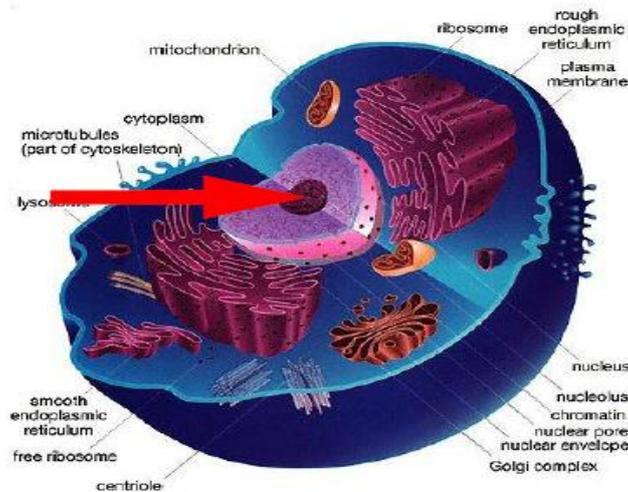
Persamaan sel prokaryota dan eukaryota:

- a. Susunan membran plasma sama
- b. Informasi genetik yang dikode DNA menggunakan kode genetik (kodon)
- c. Mekanisme transkripsi dan translasi informasi genetik sama, termasuk ribosomnya
- d. Terdapat pemisahan jalur metabolisme (misal glikolisis dan TCA)
- e. Apparatus sama untuk konservasi energi kimia seperti ATP (pada prokayota terdapat di membran plasma dan pada eukaryota terdapat di membran mitokondria).
- f. Mekanisme fotosintesis sama (antara cyanobacteria dan tumbuhan hijau daun)
- g. Mekanisme sama untuk sintesis dan penyelipan/penambahan protein membran
- h. Proteasom (struktur protein digesti) sama susunannya.

### 3. Bagian Sel

#### a. Nukleus





Gambaran 1.7 Nukleos

Nukleus terdiri atas massa protoplasma yang lebih kompak (padat), terpisah dari sitoplasma oleh *membran nukleus*, yang juga bersifat penyaring selektif, yang mengizinkan bahan keluar dari nukleus masuk sitoplasma, atau yang masuk ke dalamnya. Nukleus mengendalikan sel serta semua kegiatannya, nukleus terdiri atas bagian kromatin DNA, RNA dan protein. Tanpa nukleus sel akan mati.

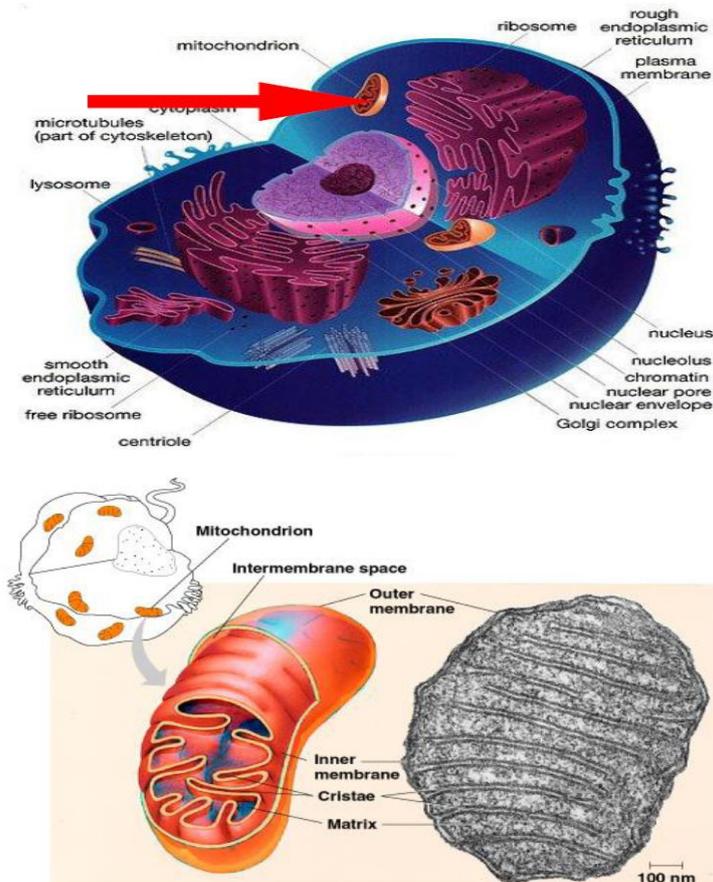
Kebanyakan sel memiliki satu nukleus, namun ada pula yang memiliki banyak nukleus, contohnya sel otot rangka, dan ada pula yang tidak memiliki nukleus, contohnya sel darah merah matang yang kehilangan nukleusnya saat berkembang.

Di dalam nukleus, DNA terorganisasi bersama dengan protein menjadi kromatin. Sewaktu sel siap untuk membelah, kromatin kusut yang berbentuk benang akan menggulung, menjadi cukup tebal untuk dibedakan melalui mikroskop sebagai struktur terpisah yang disebut kromosom.

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

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

b. Mitokondria



Gambar 1.8 Mitokondria

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

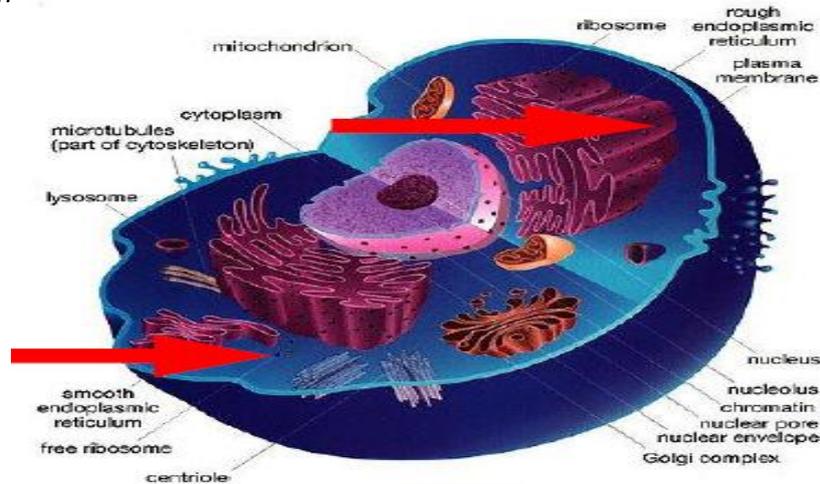
Organel ini memiliki dua macam membran, yaitu membran luar dan membran dalam, yang dipisahkan oleh ruang antar membran. Luas permukaan membran dalam lebih besar daripada membran luar karena memiliki lipatan-lipatan, atau *krista*, yang menyembul ke dalam *matrix*, atau ruang dalam mitokondria.

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

ATP tersebut dilakukan oleh enzim-enzim yang terdapat di dalam krista dan matriks mitokondria.

Struktur mitokondria banyak terdapat pada sel yang memiliki aktivitas metabolisme tinggi dan memerlukan banyak ATP dalam jumlah banyak, misalnya sel otot jantung. Jumlah dan bentuk mitokondria bisa berbeda-beda untuk setiap sel. Mitokondria berbentuk elips dengan diameter 0,5  $\mu\text{m}$  dan panjang 0,5 – 1,0  $\mu\text{m}$ . Struktur mitokondria terdiri dari empat bagian utama, yaitu membran luar, membran dalam, ruang antar membran, dan matriks yang terletak di bagian dalam membran.

c. *Ribosom*

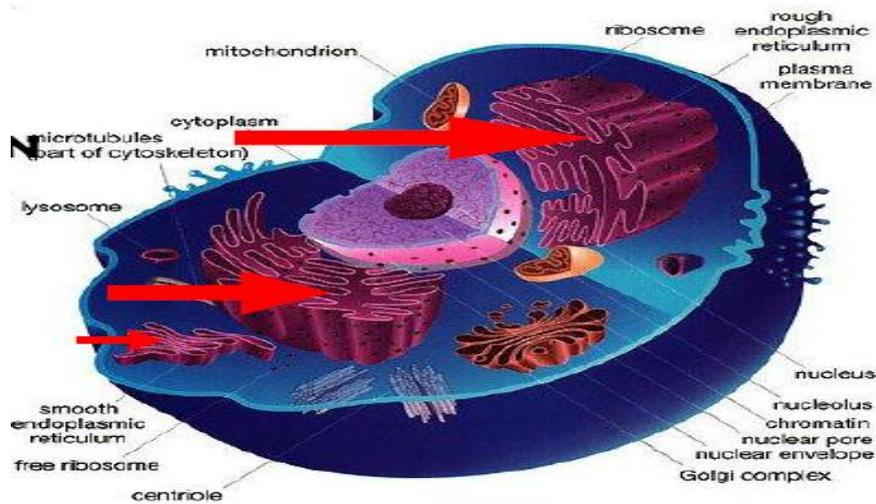


Gambar 1.9. Ribosom

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

Ribosom eukariota lebih besar daripada ribosom prokariota, namun keduanya sangat mirip dalam hal struktur dan fungsi. Keduanya terdiri dari satu subunit besar dan satu subunit kecil yang bergabung membentuk ribosom lengkap dengan massa beberapa juta dalton. Pada eukariota, ribosom dapat ditemukan bebas di sitosol atau terikat pada bagian luar retikulum endoplasma.

d. *Retikulum Endoplasma*

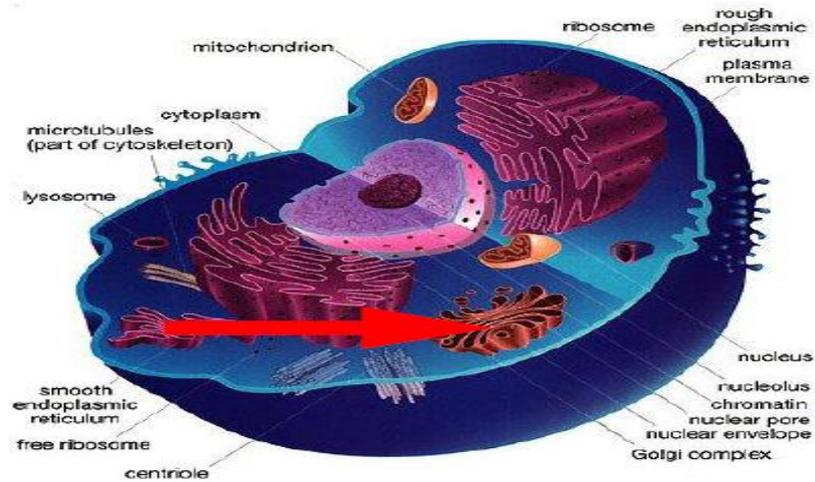


Gambar 1.10. *Retikulum Endoplasma*

Retikulum Endoplasma (RE) adalah organel yang dapat ditemukan di seluruh sel hewan eukariotik. Retikulum endoplasma merupakan perluasan selubung nukleus yang terdiri dari jaringan (*reticulum* = 'jaring kecil') saluran bermembran dan vesikel yang saling terhubung. Retikulum endoplasma memiliki struktur yang menyerupai kantung berlapis-lapis. Kantung ini disebut *cisternae*. Fungsi retikulum endoplasma bervariasi, tergantung pada jenisnya. Retikulum Endoplasma (RE) merupakan labirin membran yang demikian banyak sehingga retikulum endoplasma meliputi separuh lebih dari total membran dalam sel-sel eukariotik.

Ada tiga jenis retikulum endoplasma: RE kasar Di permukaan RE kasar, terdapat bintik-bintik yang merupakan ribosom. Ribosom ini berperan dalam sintesis protein. Maka, fungsi utama RE kasar adalah sebagai tempat sintesis protein. RE halus Berbeda dari RE kasar, RE halus tidak memiliki bintik-bintik ribosom di permukaannya. RE halus berfungsi dalam beberapa proses metabolisme yaitu sintesis lipid, metabolisme karbohidrat dan konsentrasi kalsium, detoksifikasi obat-obatan, dan tempat melekatnya reseptor pada protein membran sel. RE sarkoplasmik RE sarkoplasmik adalah jenis khusus dari RE halus. RE sarkoplasmik ini ditemukan pada otot licin dan otot lurik. Yang membedakan RE sarkoplasmik dari RE halus adalah kandungan proteinnya. RE halus mensintesis molekul, sementara RE sarkoplasmik menyimpan dan memompa ion kalsium. RE sarkoplasmik berperan dalam pemicuan kontraksi otot.

e. *Badan Golgi*

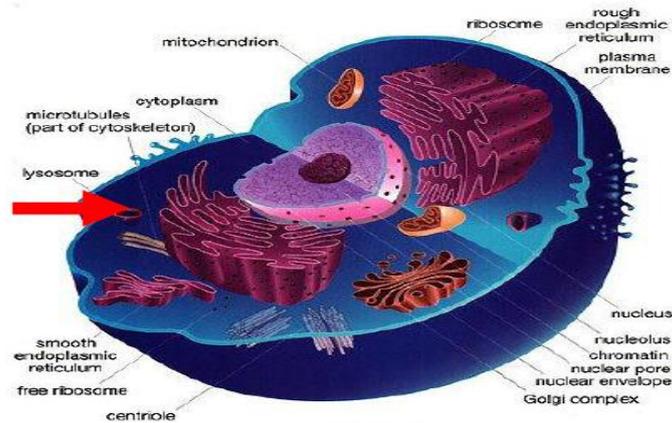


*Gambar 1.11. Badan golgi*

Badan Golgi (disebut juga aparatus Golgi, kompleks Golgi atau diktiosom) adalah organel yang dikaitkan dengan fungsi ekskresi sel, dan struktur ini dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop cahaya biasa. Organel ini terdapat hampir di semua sel eukariotik dan banyak dijumpai pada organ tubuh yang melaksanakan fungsi ekskresi, misalnya ginjal. Setiap sel hewan memiliki 10 hingga 20 badan Golgi, sedangkan sel tumbuhan memiliki hingga ratusan badan Golgi. Badan Golgi pada tumbuhan biasanya disebut diktiosom. Badan Golgi ditemukan oleh seorang ahli histologi dan patologi berkebangsaan Italia yang bernama Camillo Golgi. Beberapa fungsi badan golgi antara lain :

1. membentuk kantung (vesikula) untuk sekresi. Terjadi terutama pada sel-sel kelenjar kantung kecil tersebut, berisi enzim dan bahan-bahan lain.
2. membentuk membran plasma. Kantung atau membran golgi sama seperti membran plasma. Kantung yang dilepaskan dapat menjadi bagian dari membran plasma.
3. membentuk dinding sel tumbuhan
4. membentuk akrosom pada spermatozoa yang berisi enzim untuk memecah dinding sel telur dan pembentukan lisosom.
5. tempat untuk memodifikasi protein
6. menyortir dan memaket molekul-molekul untuk sekresi sel
7. membentuk lisosom

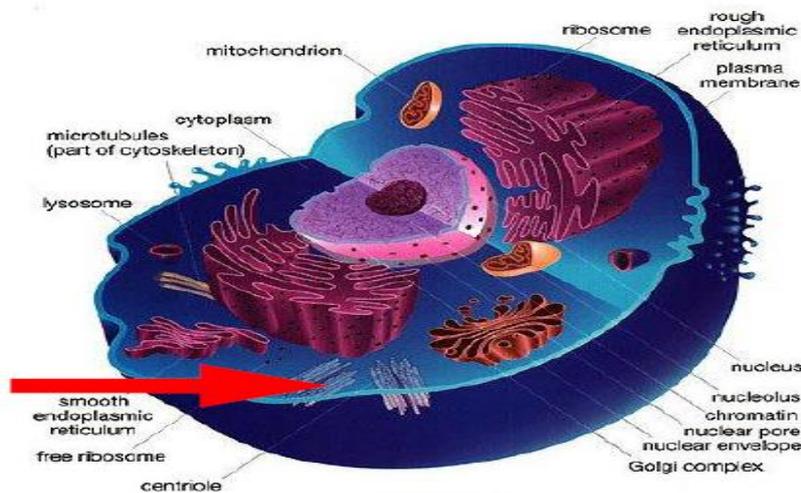
f. Lisosom



Gambar 1.12. Lisosom

Lisosom adalah organel sel berupa kantong terikat membran yang berisi enzim hidrolitik yang berguna untuk mengontrol pencernaan intraseluler pada berbagai keadaan. Lisosom ditemukan pada tahun 1950 oleh Christian de Duve dan ditemukan pada semua sel eukariotik. Di dalamnya, organel ini memiliki 40 jenis enzim hidrolitik asam seperti protease, nuklease, glikosidase, lipase, fosfolipase, fosfatase, ataupun sulfatase. Semua enzim tersebut aktif pada pH 5. Fungsi utama lisosom adalah endositosis, fagositosis, dan autofagi.

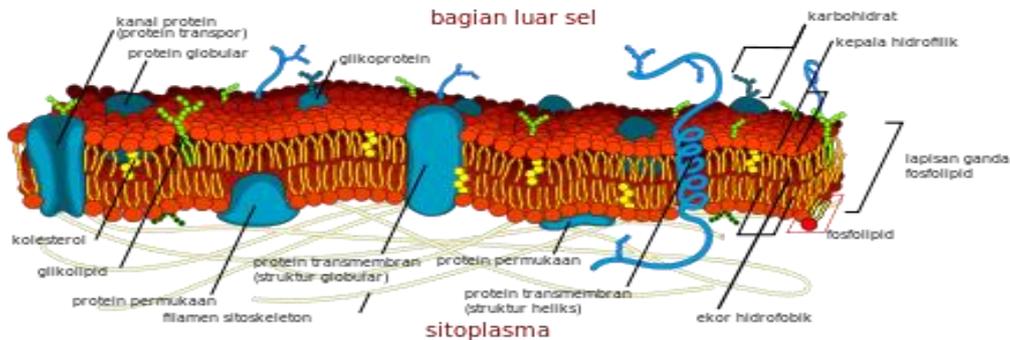
g. Sentriol



Gambar 1.13. Sentriol

Sentriol atau sentrosom merupakan wilayah yang terdiri dari dua sentriol (sepasang sentriol) yang terjadi ketika pembelahan sel, di mana nantinya tiap sentriol ini akan bergerak ke bagian kutub-kutub sel yang sedang membelah. Pada siklus sel di tahapan interfase, terdapat fase S yang terdiri dari tahap duplikasi kromosom, kondensasi kromosom, dan duplikasi sentrosom.

h. Membran



Gambar 1.14. Membran

Salah satu fungsi dari membran sel adalah sebagai lalu lintas molekul dan ion secara dua arah. Molekul yang dapat melewati membran sel antara lain ialah molekul hidrofobik (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>), dan molekul polar yang sangat kecil (air, etanol). Lalu lintas membran digolongkan menjadi dua cara, yaitu dengan transpor pasif untuk molekul-molekul yang mampu melalui membran tanpa mekanisme khusus dan transpor aktif untuk molekul yang membutuhkan mekanisme khusus.

4. Fungsi Sel

a. Metabolisme

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

b. Komunikasi sel

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

## LATIHAN

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

- 1) Sebutkan persamaan dari sel eukariot dan prokariot!
- 2) Jelaskan fungsi sel sebagai alat untuk metabolisme!
- 3) Apa yang dimaksud dengan Fagositosis!

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Persamaan sel prokaryota dan eukaryota
  - a) susunan membran plasma sama
  - b) informasi genetik yang dikode DNA menggunakan kode genetik (kodon)
  - c) Mekanisme transkripsi dan translasi informasi genetik sama, termasuk ribosomnya
  - d) Terdapat pemisahan jalur metabolisme (misal glikolisis dan TCA)
  - e) Apparatus sama untuk konservasi energi kimia seperti ATP (pada prokaryota terdapat di membran plasma dan pada eukaryota terdapat di membran mitokondria).
  - f) Mekanisme fotosintesis sama (antara cyanobacteria dan tumbuhan hijau daun)
  - g) Mekanisme sama untuk sintesis dan penyelipan/penambahan protein membran
  - h) Proteasom (struktur protein digesti) sama susunannya.
- 2) Keseluruhan reaksi kimia yang membuat makhluk hidup mampu melakukan aktivitasnya disebut metabolisme, dan sebagian besar reaksi kimia tersebut terjadi di dalam sel. Metabolisme yang terjadi di dalam sel dapat berupa reaksi katabolik, yaitu perombakan senyawa kimia untuk menghasilkan energi maupun untuk dijadikan bahan pembentukan senyawa lain, dan reaksi anabolik, yaitu reaksi penyusunan komponen sel. Salah satu proses katabolik yang merombak molekul makanan untuk menghasilkan energi di dalam sel ialah respirasi seluler, yang sebagian besar berlangsung di dalam mitokondria eukariota atau sitosol prokariota dan menghasilkan ATP. Sementara itu, contoh proses anabolik ialah sintesis protein yang berlangsung pada ribosom dan membutuhkan ATP.
- 3) Fagositosis merupakan proses pemasukan partikel berukuran besar dan mikroorganisme seperti bakteri dan virus ke dalam sel. Pertama, membran akan membungkus partikel atau mikroorganisme dan membentuk fagosom. Kemudian, fagosom akan berfusi dengan enzim hidrolitik dari trans Golgi dan berkembang menjadi lisosom (endosom lanjut).

## RINGKASAN

Sel pada tubuh organisme bentuknya ragam dan fungsinya disesuaikan dengan tugasnya masing-masing. Adanya perbedaan bentuk dan susunan sel dalam tubuh organisme, secara khusus akan menentukan bentuk dan fungsi jaringan tubuh yang terorganisir menjadi organ. Beberapa organ yang terdapat dalam tubuh organisme secara khusus akan mengatur fungsi fisiologi tubuh.

Berdasarkan jumlah sel penyusunnya, makhluk hidup dapat dibedakan menjadi uniseluler ( tersusun oleh satu sel, misalnya bakteri, ganggang hijau biru serta beberapa jenis protozoa dan jamur mikroskopik) dan multiseluler (tersusun lebih dari satu sel, misal jamur, tumbuh-tumbuhan, hewan dan manusia).

Berbagai jenis sel yang menyusun makhluk hidup dari berbagai tingkat evolusi dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar yaitu sel eukariotik dan prokariotik. Perbedaan kedua jenis ini ada pada inti sel sejati, ukuran sel sangat beragam yakni kisaran 1-10 um sampai dengan 10-100 um. Komponen kimia penyusunnya adalah air (70-90%), 15% karbohidrat, 10% lipid, 15% asam nukleat dan sisanya zat-zat anorganik.

## TES 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Perbedaan sel hewan dan sel tumbuhan adalah...
  - A. Sel tumbuhan memiliki kloroplas sehingga dapat berfotosintesis sedangkan sel hewan tidak
  - B. Sel hewan memiliki dinding sel dan sel tumbuhan tidak memiliki dinding sel
  - C. Sel hewan memiliki vakuola sedangkan sel tumbuhan tidak memiliki vakuola
  - D. Sel hewan dan sel tumbuhan adalah sel eukariot
  
- 2) Membran plasma terutama tersusun oleh ...
  - A. Air dan karbondioksida
  - B. Selulosa dan pektin
  - C. Fosfolipid dan protein
  - D. Aktin dan myosin
  
- 3) Dinding sel prokariota mengandung :
  - A. Peptidoglikan
  - B. Fosfolipid
  - C. Lipoprotein
  - D. Lipopolisakarida

- 4) Nukleolus dikelilingi oleh :
- A. Ribosom
  - B. Nukleolus
  - C. Membran nukleus
  - D. Membran plasma
- 5) Proses yang melibatkan peran ribosom adalah :
- A. Replikasi DNA
  - B. Transkripsi
  - C. Translasi
  - D. Hidrolisis protein menjadi asam amino
- 6) Di dalam mitokondria berlangsung berbagai reaksi metabolisme yang penting. Diantara jalur metabolisme berikut yang tidak berlangsung di mitokondria adalah :
- A. Siklus Krebs
  - B. Oksidasi asam lemak
  - C. Glikolisis
  - D. Rantai transport elektron dan fosforilasi oksidatif
- 7) Retikulum endoplasmik memiliki dua fungsi utama, yaitu :
- A. Transport protein dan sintesis membran sel yang baru
  - B. Sintesis protein dan menetralkan toksin
  - C. Mencerna partikel-partikel makanan dan menyimpan energi
  - D. Membantu pergerakan sel dan melindungi sel terhadap serangan dari luar
- 8) Fungsi utama badan golgi adalah:
- A. Pemrosesan dan pengepakan makromolekul yang disintesis disuatu kompartemen di dalam sel dan kemudian ditransportkan ke bagian lain dari sel atau dieksresikan keluar sel
  - B. Sintesis protein menggunakan triplet kodon yang terdapat pada molekul mRNA yang ditranskripsikan dari DNA di dalam nukleus
  - C. Modifikasi lipid menjadi glikolipid agar lebih bersifat hidrofilik
  - D. Modifikasi karbohidrat menjadi glikopeotein agar lebih mudah disisipkan pada protein di membran sel.
- 9) Lisosom mengandung enzim-enzim :
- A. Pengurai protein
  - B. Pengurai asam nukleat
  - C. Pengurai lipid
  - D. Pengurai karbohidrat

- 10) Protoplasma merupakan dasar fisik kehidupan dan sel merupakan unit fungsional dari kehidupan., pernyataan tersebut berasal dari :
- A. Felix Dujardin
  - B. Robert Brown
  - C. Max Schultze
  - D. Schleiden

## Topik 2

### Senyawa Kimia sebagai Dasar Kehidupan

Biomolekul adalah senyawa-senyawa yang bermolekul besar dan kecil yang berhubungan dengan senyawa kimia dalam sistem hidup. Sebagian besar (99%) dari unsur-unsur biomolekul adalah karbon, nitrogen, oksigen dan hidrogen serta fosfor dan belerang.

Urutan pembentukannya adalah dari molekul sederhana (CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, molekul organik sederhana), molekul pembangun (asam amino, gula sederhana, mononukleotida, asam lemak), molekul makro/polimer (protein, polisakarida, monomer penyusun DNA dan RNA, lipida), organel dan agregat supra molekul dan akhirnya membentuk sel. Semua proses kimia yang terjadi dalam sel adalah katabolisme dan anabolisme yang sama-sama berjalan dan dikendalikan oleh enzim.

Senyawa dasar dalam sel hidup secara tahap diubah ke dalam senyawa yang lebih kompleks baik fungsi maupun strukturnya. Molekul sederhana terutama CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan nitrogen atmosferik diubah melalui senyawa dasar menjadi satuan penyusun oleh jasad/sel hidup. Satuan penyusun ini bergabung melalui ikatan kovalen menjadi makromolekul dan selanjutnya membentuk molekul yang lebih besar lagi adalah supramolekul. Penggabungan senyawa dasar sehingga terbentuk supramolekul dan selanjutnya menjadi organel diatur dan dikendalikan oleh semua sistem multi enzim.

Ciri-ciri hidup adalah sangat terorganisasi dan sangat kompleks (tiap komponen mempunyai fungsi yang sangat spesifik), mempunyai kemampuan untuk mengekstrak energi dari sekelilingnya, dapat menurunkan sifat atau dapat mereplikasi dirinya sendiri dengan tepat dan terencana.

Unsur-unsur utama penyusun tubuh adalah karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O) dan nitrogen (N). Selain itu masih terdapat beberapa unsur lain yaitu: kalsium (Ca), fosfor (P), kalium (K), sulfur (S), natrium (Na), klor (Cl), magnesium (Mg), besi (Fe), mangan (Mn) dan iodium (I). Rincian dari unsur-unsur tersebut tercantum pada tabel berikut.

*Tabel Perkiraan Komposisi Dasar Tubuh Manusia  
(Berdasarkan Berat Kering)*

No	Unsur	Persentase	No	Unsur	Persentase
1	Karbon	50	8	Sulfur	0,8
2	Oksigen	20	9	Natrium	0,4
3	Hidrogen	10	10	Klor	0,4
4	Nitrogen	8,5	11	Magnesium	0,1
5	Kalsium	4	12	Besi	0,01
6	Fosfor	2,5	13	Mangan	0,001
7	Kalium	1	14	Iodium	0,00005

## A. BIOMOLEKUL-BIOMOLEKUL KOMPLEKS UTAMA PENYUSUN TUBUH

Unsur-unsur penyusun tubuh sebagaimana disebutkan di atas banyak yang membentuk molekul-molekul besar yang kompleks di dalam tubuh. Di antara biomolekul-biomolekul kompleks tersebut yang merupakan biomolekul kompleks utama adalah DNA, RNA, protein, polisakarida dan lipid. Biomolekul kompleks tersusun atas molekul-molekul sederhana, seperti terinci pada tabel berikut.

*Tabel Biomolekul-Biomolekul Utama di dalam Tubuh Manusia*

Biomolekul	Molekul Pembangun	Fungsi Utama
DNA	Deoksiribonukleotida	Materi genetik
RNA	Ribonukleotida	Sintesis protein
Protein	Asam amino	Sangat banyak, umumnya menjadi bagian dari sel yang melangsungkan kerja (enzim, unsur kontraktilitas dll.)
Polisakarida berupa glikogen	Glukosa	Simpanan energi jangka pendek.
Lipid	Asam lemak	Sangat banyak, misalnya simpanan energi jangka panjang, komponen membran sel dll.

Komponen-komponen utama penyusun tubuh terdiri atas air, protein, lemak, mineral serta karbohidrat. Rincian komponen tersebut tertera pada tabel berikut.

*Tabel Komposisi Kimiawi Normal  
(Pria dengan Berat Badan 65 kg)*

No	Komponen	Berat (kg)	Persentase
1	Air	40	61,6
2	Protein	11	17,0
3	Lemak	9	13,8
4	Mineral	4	6,1
5	Karbohidrat	1	1,5

### 1. Ikatan Kimia

Molekul di dalam tubuh, baik yang sederhana maupun yang kompleks, dapat terbentuk karena adanya ikatan kimia. Ikatan kimia digolongkan menjadi 2 yaitu ikatan

kovalen dan ikatan non kovalen. Selanjutnya, ikatan non kovalen terdiri atas ikatan ionik, ikatan hidrogen dan ikatan Van Der Waals.

*a. Ikatan kovalen*

Ikatan kovalen adalah ikatan yang terbentuk oleh valensi dari masing-masing atom. Contoh dari ikatan kovalen adalah CO<sub>2</sub>. Dalam hal ini valensi C adalah 4 dan valensi O adalah 2. Ikatan kovalen terjadi ketika masing-masing atom dalam ikatan tidak mampu memenuhi aturan oktet, dengan pemakaian elektron bersama dalam ikatan kovalen, masing-masing atom memenuhi jumlah oktetnya. Hal ini mendapat pengecualian untuk atom H yang menyesuaikan diri dengan konfigurasi atom dari He (2 $\bar{e}$  valensi) untuk mencapai tingkat kestabilannya. Selain itu, elektron-elektron yang tidak terlibat dalam ikatan kovalen disebut elektron bebas. Elektron bebas ini berpengaruh dalam menentukan bentuk dan geometri molekul.

*b. Ikatan ionik*

Ikatan ionik adalah ikatan antara dua gugus dengan muatan berlawanan. Contohnya adalah ikatan antara substrat dan enzim. Jarak optimal ikatan ini adalah 28 Angstrom. Elektrolit bukan satu-satunya zat hidrofil yang larut dalam air, molekul polar apapun memiliki tendensi untuk terlarut. Jumlah gugus polar dalam molekul mempengaruhi kelarutannya dalam air.

Pembentukan ikatan ionik dilakukan dengan cara transfer elektron. Dalam hal ini, kation terionisasi dan melepaskan sejumlah elektron hingga mencapai jumlah oktet yang disyaratkan dalam aturan Lewis. Selanjutnya, elektron yang dilepaskan ini akan diterima oleh anion hingga mencapai jumlah oktet. Proses transfer elektron ini akan menghasilkan suatu ikatan ionik yang mempersatukan ion anion dan kation.

*c. Ikatan hidrogen*

Ikatan hidrogen adalah pengikatan satu atom hidrogen oleh dua atom lain yang berbeda. Ikatan ini dapat dibentuk di antara molekul-molekul tidak bermuatan maupun molekul-molekul bermuatan. Atom yang mengikat hidrogen lebih kuat disebut donor hidrogen sedang lainnya dinamakan akseptor hidrogen. Ikatan hidrogen saat atom hidrogen terikat kovalen ke atom yang elektronegatif kuat seperti nitrogen atau oksigen.

Ikatan hidrogen ini terjadi pada ikatan antara atom H dengan atom N, O, dan F yang memiliki pasangan elektron bebas. Hidrogen dari molekul lain akan bereaksi dengan pasangan elektron bebas ini membentuk suatu ikatan hidrogen dengan besar ikatan bervariasi. Kekuatan ikatan hidrogen ini dipengaruhi oleh beda keelektronegatifan dari atom-atom penyusunnya. Semakin besar perbedaannya semakin besar pula ikatan hidrogen yang dibentuknya.

*d. Ikatan Van Der Waals*

Ikatan Van Der Waals adalah daya tarik non spesifik, yang berperan pada saat dua atom berjarak 3-4 Angstrom, terjadi pada saat dua atom berdekatan sehingga terjadi

penolakan dan penarikan bersifat dipolar atau elektrostatik dan jauh lebih lemah dari pada ikatan hidrogen.

## 2. Air

Air merupakan produk akhir utama dari metabolisme oksidatif makanan. Dalam reaksi-reaksi metabolik, air berfungsi sebagai reaktan tetapi juga sebagai produk. Air juga menjadi pelarut biologis yang ideal. Air sangat mempengaruhi semua interaksi molekuler dalam sistem biologi. Air mempunyai 2 sifat penting secara biologis yaitu sifat polar dan sifat kohesif.

### a. *Air merupakan molekul polar*

Secara tiga dimensi, air merupakan molekul tetrahedron tak beraturan dengan oksigen pada bagian pusatnya. Dua buah ikatan dengan hidrogen diarahkan ke dua sudut tetrahedron, sementara elektron-elektron yang tidak dipakai bersama pada kedua orbital terhibridasi  $sp^3$  menempati 2 sudut sisanya. Molekul air membentuk molekul bipolar (dua kutub). Sisi oksigen yang berlawanan dengan dua atom hidrogen cenderung bermuatan negatif karena mengandung lebih banyak elektron. Sedangkan di sisi hidrogen cenderung bermuatan positif.

### b. *Air bersifat sangat kohesif*

Molekul-molekul air yang berdekatan memiliki afinitas yang tinggi satu sama lainnya. Daerah bermuatan positif dan satu molekul air cenderung akan mengarahkan diri kepada daerah bermuatan negatif pada salah satu molekul didekatnya. Air beku mempunyai struktur kristal yang sangat teratur di mana seluruh ikatan hidrogen potensial memang terbentuk. Air cair mempunyai struktur yang setengah teratur dengan kelompok-kelompok molekul berikatan hidrogen yang secara terus menerus terbentuk dan terpecah

Air merupakan pelarut yang sangat baik bagi molekul-molekul polar. Air sangat memperlemah ikatan ionik dan ikatan hidrogen antara molekul-molekul polar dengan cara bersaing daya tarik.

Di dalam sel, air terdapat dalam dua bentuk, yaitu bentuk bebas dan bentuk terikat. Air dalam bentuk bebas mencakup 95% dari total air di dalam sel. Umumnya air berperan sebagai pelarut dan sebagai medium dispersi sistem koloid. Air dalam bentuk terikat mencakup 4-5% dari total air di dalam sel. Kandungan air pada berbagai jenis sel bervariasi di antara tipe sel yang berbeda.

Air merupakan medium tempat berlangsungnya transpor nutrisi, reaksi-reaksi enzimatik metabolisme sel dan transpor energi kimia. Di dalam sel hidup, kebanyakan senyawa biokimia dan sebagian besar dari reaksi-reaksinya berlangsung dalam lingkungan cair. Air berperan aktif dalam banyak reaksi biokimia dan merupakan penentu penting dari sifat-sifat makromolekul seperti protein

Karena struktur air mempunyai produk ionisasinya seperti ion  $O^+$  dan  $H^-$  maka sangat mempengaruhi berbagai sifat komponen penting sel seperti enzim, protein, asam nukleat, dan lipida. Hal yang sering muncul sebagai contoh, aktivitas katalitik enzim sangat

tergantung pada konsentrasi ion  $H^+$  dan  $OH^-$ . Karena itulah, semua aspek dari struktur dan fungsi sel harus beradaptasi dengan sifat-sifat fisik dan kimia air.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa air merupakan komponen sel yang dominan dan berfungsi untuk:

Pelarut berbagai zat organik dan anorganik, misalnya berbagai jenis ion-ion, glukosa, sukrosa, asam amino, serta berbagai jenis vitamin.

- 1) Bahan pengsuspendensi zat-zat organik dengan molekul besar seperti protein, lemak, dan pati. Dalam hal tersebut, air merupakan medium dispersi dari sistem koloid protoplasma.
- 2) Air merupakan media transpor berbagai zat yang terlarut atau yang tersuspendensi untuk berdifusi atau bergerak dari suatu bagian sel ke bagian sel yang lain.
- 3) Air merupakan media berbagai proses reaksi-reaksi enzimatik yang berlangsung di dalam sel.
- 4) Air digunakan untuk mengabsorpsi panas dan mencegah perubahan temperatur yang drastis atau mendadak di dalam sel.
- 5) Air sebagai bahan baku untuk reaksi hidrolisis dan sintesis karbohidrat misal dalam fotosintesis

Sisi oksigen yang berhadapan dengan dua hidrogen relatif kaya akan elektron, sedangkan pada sisi lainnya, inti hidrogen yang relatif tidak ditutupi membentuk daerah dengan muatan positif sehingga dikatakan bahwa molekul air bersifat dipolar atau dwi kutub karena pemisahan muatan tersebut maka dua molekul air dapat tertarik satu dengan yang lainnya oleh gaya elektrostatik di antara muatan negatif sebagian pada atom oksigen dari suatu molekul air dan muatan positif sebagian pada atom hidrogen dari molekul air yang lain. Jenis interaksi elektrostatik ini disebut ikatan hidrogen.

Ikatan hidrogen segera terbentuk antara atom yang bersifat elektronegatif, biasanya atom oksigen atau nitrogen, dan suatu atom hidrogen yang berikatan kovalen dengan atom elektronegatif lainnya pada molekul yang sama atau molekul lain. Atom hidrogen yang berikatan dengan atom elektronegatif kuat seperti oksigen cenderung mempunyai muatan positif kuat sebagian. Akan tetapi, atom hidrogen yang berikatan kovalen dengan atom karbon yang tidak bersifat elektronegatif tidak berpartisipasi dalam pembentukan ikatan hidrogen.

Pada es, molekul  $H_2O$  terikat secara ikatan hidrogen berjumlah 4 molekul  $H_2O$  yang lain dalam suatu deretan tiga dimensi yang teratur sehingga es kurang padat dan memiliki massa lebih kecil dari pada air.

Dalam sistem hidup, ikatan hidrogen berperan penting, contohnya protein dan asam nukleat.

Sifat-sifat air yang tepat bagi sistem hidup adalah;

- 1) Kalor penguapan contohnya keringat
- 2) Kalor jenis contohnya air sebagai buffer panas yang baik

3) Titik didih contohnya air tetap cair walaupun pada suhu fisiologik .

Jumlah gugus polar akan mempengaruhi kelarutannya, contohnya glukosa yang mengandung lima gugus hidroksil dan cincin oksigen sangat larut dalam air. Tiap atom oksigen glukosa dapat membentuk ikatan hidrogen dengan air. Penempelan karbohidrat ke sebagian molekul kurang larut, termasuk lipid dan basa-basa nukleotida menaikan kelarutannya.

Saat membran pelarut permeabel memisahkan dua larutan yang mengandung konsentrasi yang berbeda, molekul pelarut berdifusi dari konsentrasi yang rendah ke konsentrasi yang lebih tinggi. Proses ini disebut osmosis yang tekanannya tergantung pada konsentrasi zat terlarut dan bukan pada sifat kimianya.

Dalam sel hidup, membran air permeabel memisahkan sitosol dari medium luar. Komposisi larutan intra sel cukup berbeda dari larutan ekstra sel. Contohnya sel hewan menyimpan glukosa dalam polimer glikogen yang mengandung 50.000 residu glukosa, tekanan osmotik dalam sel lebih besar sehingga

Aktivitas makhluk hidup tidak hanya bergantung pada biomolekul tetapi juga pada input energi. Makhluk hidup secara konstan mentransformasikan energi menjadi kerja yang berguna untuk mempertahankan diri, untuk tumbuh dan untuk reproduksi.

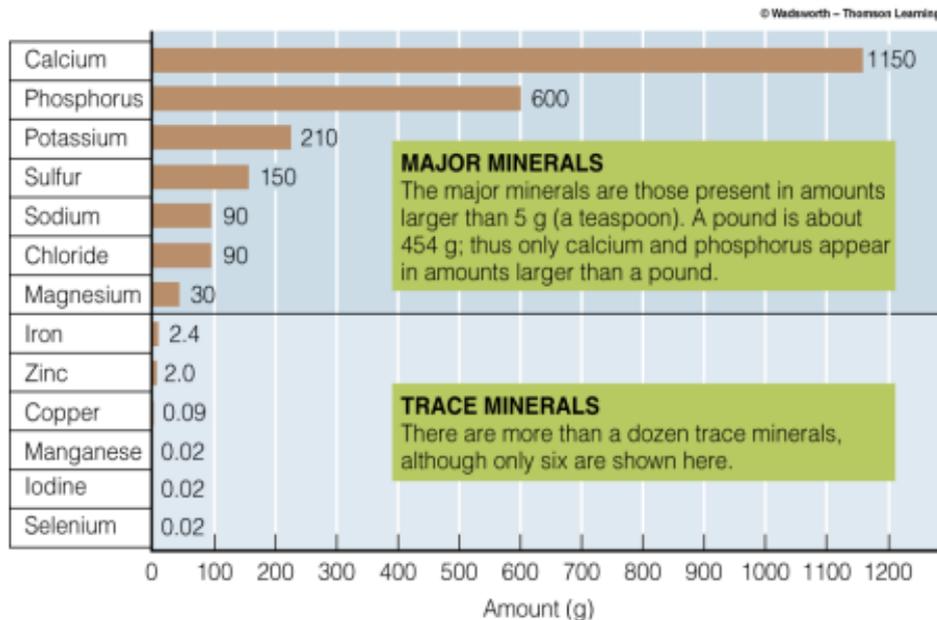
### **3. Garam Mineral**

Kandungan garam-garam mineral pada berbagai tipe sel sangat bervariasi. Di dalam sel, garam-garam mineral dapat mengalami disosiasi menjadi anion dan kation. Bentuk-bentuk anion dan kation tersebut dinamakan ion. Ion-ion dapat terlarut di dalam cairan sel atau terikat secara khusus pada molekul-molekul lain seperti protein dan lipida. Secara umum, garam-garam mineral memiliki dua fungsi yaitu :

- a. Fungsi osmosis, dalam arti bahwa konsentrasi total garam-garam terlarut berpengaruh terhadap pelaluan air melintasi membran sel
- b. Fungsi yang lebih spesifik, yaitu peran seluler setiap ion terhadap struktur dan fungsi dari partikel-partikel seluler dan makromolekul.

Unsur mineral merupakan salah satu komponen yang sangat diperlukan oleh makhluk hidup di samping karbohidrat, lemak, protein, dan vitamin, juga dikenal sebagai zat anorganik atau kadar abu. Sebagai contoh, bila bahan biologis dibakar, semua senyawa organik akan rusak; sebagian besar karbon berubah menjadi gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hidrogen menjadi uap air, dan nitrogen menjadi uap nitrogen (N<sub>2</sub>). Sebagian besar mineral akan tertinggal dalam bentuk abu dalam bentuk senyawa anorganik sederhana, serta akan terjadi penggabungan antar individu atau dengan oksigen sehingga terbentuk garam anorganik. Berbagai unsur anorganik (mineral) terdapat dalam bahan biologi, tetapi tidak atau belum semua mineral tersebut terbukti esensial, sehingga ada mineral esensial dan nonesensial. Mineral esensial yaitu mineral yang sangat diperlukan dalam proses fisiologis makhluk hidup untuk membantu kerja enzim atau pembentukan organ. Unsur-unsur mineral esensial dalam tubuh terdiri atas dua golongan, yaitu mineral makro dan mineral mikro.

Mineral makro diperlukan untuk membentuk komponen organ di dalam tubuh. Mineral mikro yaitu mineral yang diperlukan dalam jumlah sangat sedikit dan umumnya terdapat dalam jaringan dengan konsentrasi sangat kecil. Mineral nonesensial adalah logam yang perannya dalam tubuh makhluk hidup belum diketahui dan kandungannya dalam jaringan sangat kecil. Bila kandungannya tinggi dapat merusak organ tubuh makhluk hidup yang bersangkutan. Di samping mengakibatkan keracunan, logam juga dapat menyebabkan penyakit defisiensi.



Gambar 1. Komposisi major mineral dan rance mineral

Berbagai jenis garam-garam mineral sangat penting untuk kelangsungan aktivitas metabolisme sel, misalnya ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{K}^+$ , ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{K}^+$ , berperan dalam memelihara tekanan osmosis dan keseimbangan asam basa cairan sel. Retensi ion-ion menghasilkan peningkatan tekanan osmosis sebagai akibat masuknya air ke dalam sel.

Beberapa ion-ion anorganik berperan sebagai kofaktor dalam aktivitas enzim, misalnya ion magnesium, ferrum fosfat anorganik digunakan dalam sintesis ATP yang mensuplai energi kimia untuk proses kehidupan dari sel melalui proses fosforilasi oksidatif. Ion-ion kalsium dijumpai dalam sirkulasi darah dan di dalam sel. Di dalam tulang, ion-ion kalsium berkombinasi dengan ion-ion fosfat dan karbonat membentuk kristalin. Fosfat dijumpai di dalam darah dan di dalam cairan jaringan sebagai ion-ion bebas, tetapi fosfat di dalam tubuh banyak terikat dalam bentuk fosfolipida, nukleotida, fosfoprotein, dan gula-gula terfosforilasi.

## LATIHAN

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

- 1) Jelaskan mengenai ikatan kimia !
- 2) Jelaskan mengenai ikatan hidrogen !
- 3) Apa yang dimaksud dengan Cryogenic !

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Molekul di dalam tubuh baik yang sederhana sampai dengan yang kompleks dapat terbentuk karena adanya ikatan kimia. Ikatan kimia digolongkan menjadi 2 yaitu ikatan kovalen dan ikatan non kovalen. Selanjutnya ikatan non kovalen terdiri atas ikatan ionik, ikatan hidrogen dan ikatan Van Der Waals.
- 2) Ikatan hidrogen adalah pengikatan satu atom hidrogen oleh dua atom lain yang berbeda. Ikatan ini dapat dibentuk di antara molekul-molekul tidak bermuatan maupun molekul-molekul bermuatan. Atom yang mengikat hidrogen lebih kuat disebut donor hidrogen sedang lainnya dinamakan akseptor hidrogen
- 3) Cryogenics adalah proses ketika para ilmuwan membekukan sesuatu. Ketika hidrogen dalam bentuk cair sangat dingin. Para ilmuwan menggunakan hidrogen dingin ini untuk membekukan sesuatu dengan sangat cepat.

## RINGKASAN

Ciri-ciri hidup adalah sangat terorganisasi dan sangat kompleks (tiap komponen mempunyai fungsi yang sangat spesifik), mempunyai kemampuan untuk mengekstrak energi dari sekelilingnya, dapat menurunkan sifat atau dapat mereplikasi dirinya sendiri dengan tepat dan terencana.

Unsur-unsur utama penyusun tubuh adalah karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O) dan nitrogen (N). Selain itu masih terdapat beberapa unsur lain yaitu: kalsium (Ca), fosfor (P), kalium (K), sulfur (S), natrium (Na), klor (Cl), magnesium (Mg), besi (Fe), mangan (Mn) dan iodium (I).

Molekul di dalam tubuh baik yang sederhana sampai dengan yang kompleks dapat terbentuk karena adanya ikatan kimia. Ikatan kimia digolongkan menjadi 2 yaitu ikatan kovalen dan ikatan non kovalen. Air merupakan produk akhir utama dari metabolisme oksidatif makanan. Dalam reaksi-reaksi metabolik, air berfungsi sebagai reaktan tetapi juga sebagai produk. Air juga menjadi pelarut biologis yang ideal.

Hidrogen adalah unsur pertama dalam tabel periodik. Hidrogen merupakan atom yang paling sederhana yang terdiri dari satu proton dalam inti yang mengorbit oleh elektron tunggal. Nitrogen atau zat lemas adalah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang N dan nomor atom 7. Biasanya ditemukan sebagai gas tanpa warna, tanpa bau, tanpa rasa dan merupakan gas diatomik bukan logam yang stabil, sangat sulit bereaksi

dengan unsur atau senyawa lainnya. Oksigen adalah unsure yang sangat umum diantara unsure-unsur golongan VI yang beranggotaan O, S, Se, Te, dan Po. Oksigen mempunyai konfigurasi  $s^2p^4$  dalam tingkat energy yang tertinggi. Oksigen dapat membuat ikatan unsure dan ikatan kovalen dengan unsur-unsur lain.

## TES 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Massa sel ( 60-90% ) sebagian besarnya adalah ...
  - A. Protein
  - B. Air
  - C. Makanan
  - D. Oksigen
  
- 2) Molekul air membentuk sudut  $104,5^\circ$  untuk O-H dengan ikatan ...
  - A. Kovalen
  - B. Ion
  - C. Polar
  - D. Non polar
  
- 3) Zat yang mudah larut dalam air ...
  - A. Hidrofob
  - B. Hidrofil
  - C. Elektrolit
  - D. Ion negative
  
- 4) Karbohidrat, protein, lemak, termasuk ke dalam :
  - A. Biomakromolekul
  - B. Mikronutrien
  - C. Mikromolekul
  - D. Organel sel
  
- 5) Selain di sel hati, glikogenesis juga berlangsung :
  - A. Otot
  - B. Hati
  - C. Jantung
  - D. Ginjal

- 6) Karbon,nitrogen,oksigen dan hidrogen merupakan unsur-unsur utama dari :
- A. Sel
  - B. Unsur runutan
  - C. Molekul makro
  - D. Polimer
- 7) Proses-proses metabolisme dikendalikan oleh :
- A. Enzim
  - B. Protein
  - C. Glukosa
  - D. pH
- 8) Senyawa bermolekul kecil akan dirangkai untuk menghasilkan molekul yang diperlukan tubuh melalui jalur:
- A. Biosintesis
  - B. Asam amino
  - C. Hidrolisis
  - D. Glukosa
- 9) Penguraian senyawa bermolekul besar menjadi senyawa bermolekul kecil disebut :
- A. Katabolisme
  - B. Anabolisme
  - C. Gliserol
  - D. Triasilgliserol
- 10) Contoh reaksi anabolisme adalah :
- A. Biosintesis protein
  - B. Vitamin
  - C. Enzim
  - D. Katalisator

## Kunci Jawaban Tes

### Tes 1

- 1) Jawabannya (B) karena sel prokariotik tidak memiliki nukleus atau inti sel.
- 2) Jawabannya (A) Karena perbandingan sel hewan dan tumbuhan adalah adanya kloroplas untuk tempat fotosintesis dan adanya dinding sel
- 3) Jawabannya (C) karena setiap sel baik prokariota dan eukariota memiliki membran plasma yang memberi batas dengan lingkungan luar dan tersusun dari lipid dan protein.
- 4) Jawabannya (D) karena dinding sel prokariota mengandung lipopolisakarida.
- 5) Jawabannya (A) karena nukleolus merupakan bagian padat yang terbentuk dari molekul-molekul RNA dan tempat pembentukan ribosom.
- 6) Jawabannya (C) karena ribosom adalah organel sel yang bertugas membaca kode genetik yang dibawa mRNA dan mentranslasikan menjadi protein.
- 7) Jawabannya (C) karena glikolisis merupakan proses pengubahan glukosa menjadi asam piruvat dan berangsur di sitosol.
- 8) Jawabannya (A) karena retikulum endoplasma adalah tempat sintesa dan transport protein.
- 9) Jawabannya (A) karena fungsi utama badan golgi adalah untuk pemrosesan dan pengepakan makromolekul yang disintesis di suatu kompartemen di dalam sel dan ditransportkan kebagian lain dari sel.
- 10) Jawabannya (A) karena fungsinya penghancur atau pengurai organel-organel sel yang sudah tidak diperlukan karena rusak atau jumlahnya berlebihan.

### Tes 2

- 1) Jawaban (B) massa sel sebagian besar adalah air
- 2) Jawaban (A) Ikatan dalam molekul air
- 3) Jawaban (A) Sifat zat yang mudah larut air
- 4) Jawaban (A) biomolekul (karbohidrat,protein, lipid)
- 5) Jawaban (A) jalur pengubahan glukosa menjadi glukogen
- 6) Jawaban (A) unsur-unsur utama dari sel
- 7) Jawaban (A) Proses metabolisme dikendalikan oleh enzim sebagai biokatalisator
- 8) Jawaban (A) proses biosintesis
- 9) Jawaban (A) senyawa yang bermolekul besar diuraikan
- 10) Jawaban (A) contoh reaksi anabolisme

## Daftar Pustaka

Alberts, B. et al. 2010. *Molecular Biology of the Cell*. New York : Garland Publishing.

Bogen, HJ. 2009. *Modern Biology*. London : Weidenfeld Nicolson.,

Subowo. 2012. *Biologi Sel*. Bandung : Pencetak/Penerbit Elstar Offset.

Yatim W. 2013. *Biology Modern*. Bandung : Penerbit transitio.

Yatim W. 2010. *Biology Sel*. Bandung ; Penerbit Transito.

## BAB II KARBOHIDRAT

*Dra. Mimin Kusmiyati, M.Si.*

### PENDAHULUAN

Karbohidrat ('hidrat dari karbon', hidrat arang) atau sakarida (dari bahasa Yunani σάκχαρον, sákcharon, berarti "gula") adalah segolongan besar senyawa organik yang paling melimpah di bumi. Karbohidrat sendiri terdiri atas karbon, hidrogen, dan oksigen. Karbohidrat memiliki berbagai fungsi dalam tubuh makhluk hidup, terutama sebagai bahan bakar (contoh glukosa), cadangan makanan (misalnya pati pada tumbuhan dan glikogen pada hewan), dan materi pembangun (misalnya selulosa pada tumbuhan, kitin pada hewan dan jamur). Pada proses fotosintesis, tetumbuhan hijau mengubah karbon dioksida menjadi karbohidrat.

Secara biokimia, karbohidrat adalah polihidroksil-aldehida atau polihidroksil-ke-ton, atau senyawa yang menghasilkan senyawa-senyawa ini bila dihidrolisis. Karbohidrat mengandung gugus fungsi karbonil (sebagai aldehida atau keton) dan banyak gugus hidroksil. Pada awalnya, istilah karbohidrat digunakan untuk golongan senyawa yang mempunyai rumus  $(CH_2O)_n$ , yaitu senyawa-senyawa yang  $n$  atom karbonnya tampak terhidrasi oleh  $n$  molekul air. Namun demikian, terdapat pula karbohidrat yang tidak memiliki rumus demikian dan ada pula yang mengandung nitrogen, fosforus, atau sulfur.

Di dalam tubuh makhluk hidup, karbohidrat mempunyai fungsi utama sebagai sumber energi, namun di samping itu beberapa senyawa karbohidrat juga merupakan pembentuk struktur tubuh, misalnya selulosa yang merupakan komponen utama dinding sel tumbuhan dan chitin yang banyak ditemukan pada cangkang serangga dan dinding sel jamur. Karbohidrat juga ditemukan pada setiap sel makhluk hidup yang berperan antara lain sebagai alat komunikasi sel.

Karbohidrat mempunyai fungsi utama sebagai sumber energi dan pembentuk struktur tubuh. Secara rinci, pokok bahasan yang akan kita diskusikan pada modul 2 ini meliputi definisi, klasifikasi dan struktur karbohidrat. Selanjutnya, akan dibahas juga tentang ikatan glikosidik, daya reduksi dan proses metabolisme karbohidrat.

Setelah mempelajari bab 2 ini dengan saksama, Anda diharapkan dapat menjelaskan karbohidrat sebagai sebagai sumber energi dan pembentuk struktur tubuh serta proses metabolismenya. Secara rinci, Anda diharapkan dapat menjelaskan :

1. definisi, klasifikasi, dan struktur karbohidrat
2. ikatan glikosidik
3. daya reduksi karbohidrat
4. metabolisme karbohidrat

Pengetahuan dan pemahaman Anda kimia organik akan sangat membantu ketika Anda belajar tentang karbohidrat ini. Oleh karenanya, silakan pelajari lagi materi kimia organik tersebut sebelum Anda mempelajari karbohidrat lebih jauh.

Bab tentang karbohidrat dapat digunakan untuk memahami tentang karbohidrat dari mulai sebagai makromolekul sampai kepada reaksi atau perubahan kimia yang terjadi pada senyawa-senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup.

Untuk memfasilitasi belajar mandiri Anda, materi dalam bab 2 ini dikemas dalam 2 (dua) topik, yaitu:

- Topik 1. Karbohidrat (definisi, klasifikasi, struktur, ikatan glikosidik, dan daya reduksi karbohidrat)
- Topik 2. Metabolisme Karbohidrat

## Topik 1 Karbohidrat

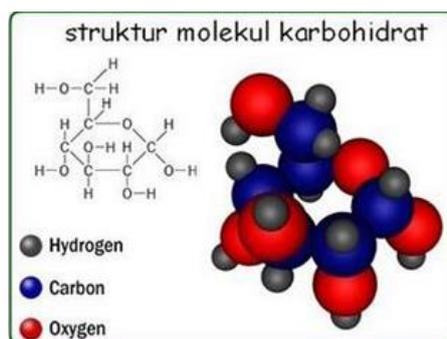
Biomolekul adalah molekul-molekul atau senyawa-senyawa kimia yang berperan dalam sistem kehidupan. Sebagian molekul merupakan molekul-molekul berukuran kecil/mikro molekul dan sebagian lagi merupakan molekul-molekul berukuran besar termasuk karbohidrat sebagai biomakro molekul.

Karbohidrat biasanya didefinisikan sebagai polihidroksi aldehida dan keton atau zat yang dihidrolisis menghasilkan polihidroksi aldehida dan keton. Karbohidrat biasa disebut juga karbon hidrat, hidrat arang, sacharon (sakarida) atau gula. Karbohidrat berarti karbon yang terhidrat. Rumus umumnya adalah  $C_x(H_2O)_y$ . Karbohidrat dibuat oleh tanaman melalui proses fotosintesis.



Karbohidrat adalah senyawa karbonil alami dengan beberapa gugus hidroksil. Bahan yang tergolong karbohidrat adalah gula (monosakarida) dan polimernya yaitu oligosakarida dan polisakarida. Berdasarkan letak gugus karbonilnya, dapat dibedakan 2 jenis monosakarida yaitu: aldosa yang gugus karbonilnya berada di ujung rantai dan berfungsi sebagai aldehida dan ketosa yang gugus karbonilnya berlokasi di dalam rantai.

Molekul karbohidrat terdiri atas atom – atom karbon, hydrogen, dan oksigen. Jumlah atom hidrogen dan oksigen merupakan perbandingan 2:1 seperti pada molekul air. Sebagai contoh molekul glukosa mempunyai rumus kimia  $C_6H_{12}O_6$  sedangkan rumus sukrosa adalah  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Pada glukosa tampak bahwa jumlah atom hidrogen berbanding jumlah atom oksigen ialah 12:6 atau 2:1, sedangkan pada sukrosa 22:11. Dengan demikian dahulu orang berkesimpulan adanya air dalam karbohidrat. Karena inilah maka dipakai kata karbohidrat, yang berasal dari “karbon” yang berarti mengandung unsur karbon dan “hidrat” yang berarti air. Pada senyawa yang termasuk karbohidrat terdapat gugus fungsi yaitu gugus –OH, gugus aldehyd atau gugus keton. Struktur karbohidrat selain mempunyai hubungan dengan sifat kimia yang ditentukan oleh gugus fungsi, ada pula hubungannya dengan sifat fisika, dalam hal ini aktifitas optik.



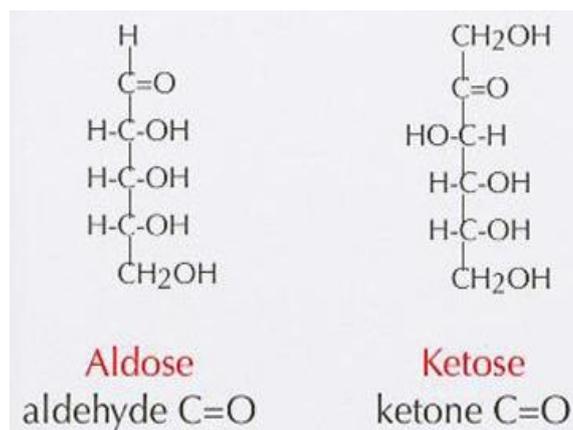
Banyak sekali makanan yang kita makan sehari-hari adalah sumber karbohidrat seperti: nasi/beras, singkong, umbi-umbian, gandum, sagu, jagung, kentang, dan beberapa buah-buahan lainnya, dan lain-lain.

Rumus umum karbohidrat yaitu  $C_n(H_2O)_m$ , sedangkan yang paling banyak kita kenal yaitu glukosa:  $C_6H_{12}O_6$ , sukrosa:  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , selulosa:  $(C_6H_{10}O_5)_n$

a. *Klasifikasi Karbohidrat*

**1. Monosakarida**

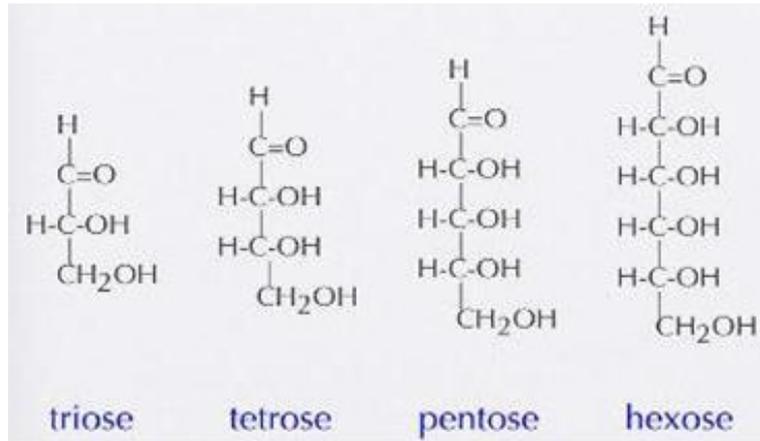
Monosakarida ialah gula ringkas dan merupakan unit yang paling kecil (yang tidak dapat dipecahkan oleh hidrolisis asid kepada unit yang lebih kecil). Monosakarida terdiri atas 3-6 atom C. Beberapa molekul monosakarida mengandung unsur nitrogen dan sulfur. Monosakarida yang penting dalam fisiologi ialah D-glukosa, D-galaktosa, D-fruktosa, D-ribosa, dan D-deoksiribosa. Monosakarida digolongkan berdasarkan jumlah atom karbon yang dikandungnya (triosa, tetrosa, pentosa, dan heksosa) dan gugus aktifnya, yang bisa berupa aldehida atau keton. Ini kemudian bergabung, menjadi misalnya aldohexosa dan ketotriosa.



*Gambar: Klasifikasi karbohidrat menurut lokasi gugus karbonil*

Monosakarida mempunyai rumus kimia  $(CH_2O)_n$  di mana  $n=3$  atau lebih. Jika gugus karbonil pada ujung rantai monosakarida adalah turunan aldehida, maka monosakarida ini disebut aldosa. Dan bila gugusnya merupakan turunan keton maka monosakarida tersebut disebut ketosa. Monosakarida aldosa yang paling sederhana adalah gliseraldehida. Sedangkan monosakarida ketosa yang paling sederhana adalah dihidroksiaseton.

Kedua monosakarida sederhana tersebut masing-masing mempunyai tiga atom karbon (triosa). Monosakarida lain mempunyai empat atom karbon (tetrosa), lima atom karbon (pentosa), dan enam atom karbon (heksosa). Heksosa, zat manis dan berbentuk kristalin, adalah salah satu monosakarida terpenting. Beberapa contoh heksosa sehari-hari adalah gula tebu, gula gandum, gula susu, pati, dan selulosa. Pentosa umum adalah ribosa yaitu salah satu unit penyusun mononukleotida asam nukleat.



Gambar: Klasifikasi karbohidrat menurut jumlah atom C

Sifat-sifat monosakarida adalah :

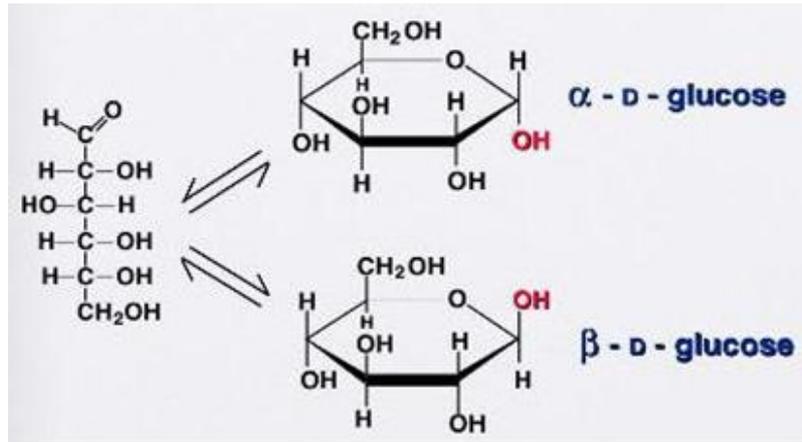
1. Semua monosakarida zat padat putih, mudah larut dalam air.
2. Larutannya bersifat optis aktif.
3. Larutan monosakarida yang baru dibuat mengalami perubahan sudut putaran disebut mutar rotasi.
4. Umumnya disakarida memperlihatkan mutar rotasi, tetapi polisakarida tidak.
5. Semua monosakarida merupakan reduktor sehingga disebut gula pereduksi.
6. Kebanyakan tidak berwarna, padat kristalin (manis).

Monosakarida dengan rumus umum  $C_6H_{12}O_6$ , terdiri atas unit glukosa, fruktosa dan galaktosa. Glukosa disebut juga gula darah. Galaktosa banyak terdapat dalam susu dan yogurth. Fruktosa banyak ditemukan dalam buah-buahan dan madu.

## 2. Monosakarida

### a. D-glukosa (karbohidrat terpenting dalam diet)

Glukosa adalah suatu aldoheksosa dan sering disebut dekstrosa karena mempunyai sifat dapat memutar cahaya terpolarisasi ke arah kanan. Monosakarida ini mengandung lima gugus hidroksil dan sebuah gugus aldehida yang dilekatkan pada rantai enam karbon. Fungsi utama glukosa adalah sumber energi dalam sel hidup. Glukosa disebut juga gula anggur karena terdapat dalam buah anggur, gula darah karena terdapat dalam darah atau dekstrosa karena memutar bidang polarisasi kekanan. Glukosa merupakan monomer dari polisakarida terpenting yaitu amilum, selulosa, dan glikogen. Glukosa merupakan senyawa organik terbanyak terdapat pada hidrolisis amilum, sukrosa, maltosa, dan laktosa. Di alam, glukosa terdapat dalam buah-buahan dan madu lebah.



Gambar: D-glukosa  
(perhatikan bahwa glukosa mengalami siklisasi membentuk struktur cincin)

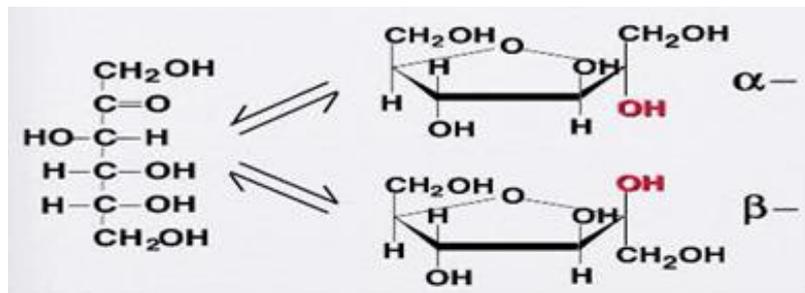
Tab 1.3.1. Tingkat Kemanisan Beberapa Gula

Nama Gula	Tingkat Kemanisan
Laktosa	16
Maltosa	33
Glukosa	74
Sukrosa	100
Gula inversi	130
Fruktosa	173

b. D-fruktosa (termanis dari semua gula)

Fruktosa adalah suatu ketohektosa yang mempunyai sifat memutar cahaya terpolarisasi ke kiri dan karenanya disebut juga levulosa. Fruktosa mengandung lima gugus hidroksil dan gugus karbonil keton pada C-2 dari rantai enam-karbon. Molekul ini kebanyakan berada dalam bentuk siklik.

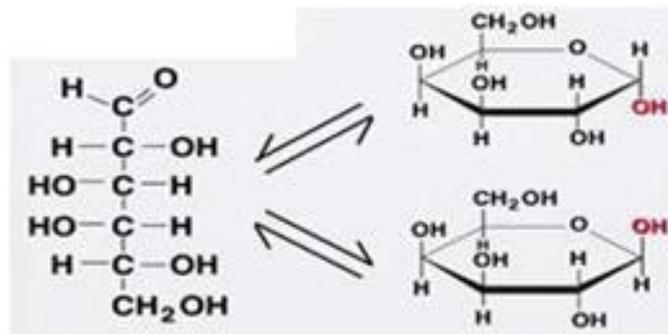
Fruktosa terdapat dalam buah-buahan, merupakan gula yang paling manis. Bersama dengan glukosa merupakan komponen utama dari madu.



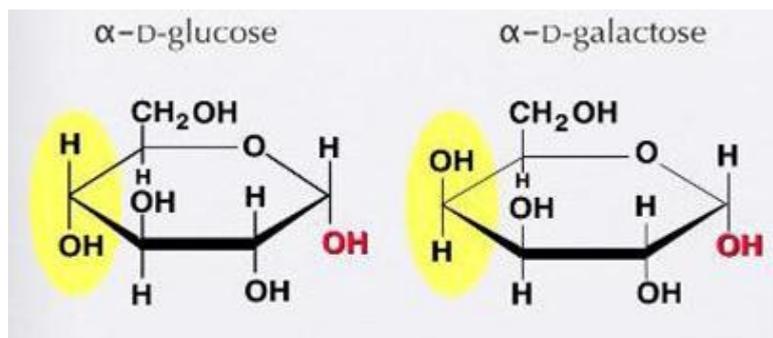
Gambar: D-fruktosa (perhatikan bahwa fruktosa mengalami siklisasi membentuk struktur cincin)

c. *D-galaktosa (bagian dari susu)*

Galaktosa merupakan monosakarida yang jarang terdapat bebas di alam. Umumnya berikatan dengan glukosa dalam bentuk laktosa, yaitu gula yang terdapat dalam susu. Galaktosa mempunyai rasa kurang manis dari pada glukosa dan kurang larut dalam air. Galaktosa mempunyai sifat memutar bidang polarisasi kekanan.



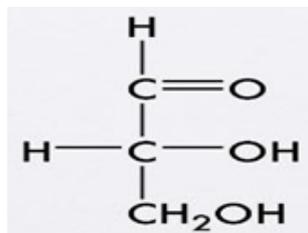
Gambar: *D-galaktosa*  
(perhatikan bahwa galaktosa mengalami siklisasi membentuk struktur cincin)



Gambar: Perbedaan pokok antara *D-glukosa* dan *D-galaktosa*  
(perhatikan daerah berarsis lingkaran)

d. *D-gliseraldehid (karbohidrat paling sederhana)*

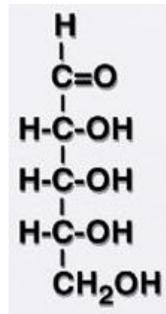
Karbohidrat ini hanya memiliki 3 atom C (triosa), berupa aldehyd (aldosa) sehingga dinamakan aldotriosa.



Gambar: *D-gliseraldehid*  
(perhatikan bahwa gula ini hanya memiliki 3 atom C sehingga disebut paling sederhana)

e. *D-ribosa (digunakan dalam pembentukan RNA)*

Karena merupakan penyusun kerangka RNA maka ribosa penting artinya bagi genetika bukan merupakan sumber energi. Jika atom C nomor 2 dari ribosa kehilangan atom O, maka akan menjadi deoksiribosa yang merupakan penyusun kerangka DNA.

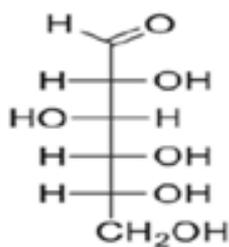


Gambar: *D-ribosa (perhatikan gula ini memiliki 5 atom C)*

### 3. Penulisan Struktur Monosakarida

a. *Proyeksi Fischer*

Proyeksi Fischer sangat bermanfaat dalam penulisan struktur molekul gula (monosakarida). Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam penulisan proyeksi Fischer. Proyeksi Fischer adalah penggambaran struktur 3-D dalam bentuk 2-D (dua dimensi). Pada proyeksi Fischer rantai karbon ditulis dari atas kebawah, dimana gugus yang paling tinggi prioritasnya diletakkan pada bagian atas. Setiap persilangan garis mengandung satu atom karbon. Atom atau gugus atom di sebelah kiri dan kanan dari rantai karbon berarti berada di bagian depan bidang (mengarah kedepan kearah pembaca) dan yang bagian atas atau bawah dari atom karbon yang menjadi perhatian berada di belakang bidang (menjauhi pembaca).



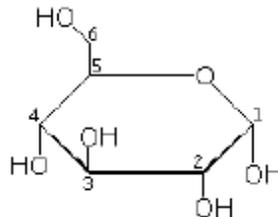
Gambar: *Proyeksi Fischer dari D-glukosa*

b. *Proyeksi Haworth*

Proyeksi Haworth ialah cara umum menggambarkan struktur lingkar monosakarida dengan perspektif tiga dimensi sederhana. Proyeksi Haworth dinamai menurut kimiawan Inggris Sir Walter N. Haworth.

Proyeksi Haworth memiliki ciri-ciri sebagai berikut

- 1) Karbon ialah jenis implisit atom. Dalam contoh di kanan, atom-atom yang diberi angka 1 hingga 6 semuanya atom karbon. Karbon 1 dikenal sebagai karbon anomer.
- 2) Atom hidrogen pada karbon itu implisit. Dalam contoh ini, atom 1 sampai 6 memiliki atom hidrogen aktra yang tak digambarkan.
- 3) Garis yang dipertebal menandai atom yang lebih dekat ke pengamat. Dalam contoh ini di kanan, atom 2 dan 3 (dan grup OH yang berhubungan) paling dekat ke pengamat, atom 1 dan 4 lebih jauh dari pengamat dan akhirnya atom sisanya (5, dsb.) ialah yang terjauh.



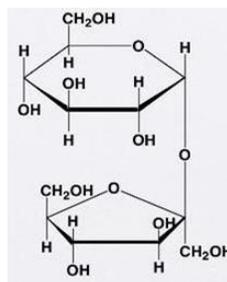
Gambar: Proyeksi Haworth atas struktur  $\alpha$ -D-glukopiranososa

## B. DISAKARIDA

Disakarida adalah senyawa yang terbentuk dari dua molekul monosakarida yang sejenis atau tidak. Disakarida dapat dihidrolisis oleh larutan asam dalam air sehingga terurai menjadi dua molekul monosakarida. Disakarida terdiri atas unit sukrosa, maltosa, laktosa dan selobiosa. Keempat disakarida ini mempunyai rumus molekul sama ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) tetapi struktur molekulnya berbeda. Disakarida disusun oleh dua unit gula, seperti sukrosa disusun oleh glukosa dan fruktosa, maltosa dibangun oleh dua unit glukosa, dan laktosa dibangun oleh glukosa dan galaktosa. Disakarida-disakarida penting yaitu:

### 1. Sukrosa

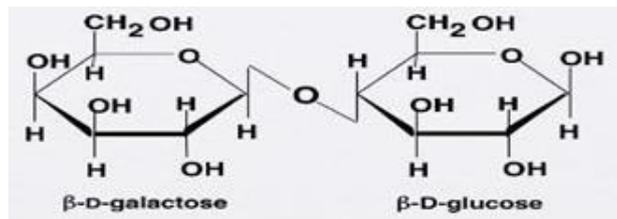
Sukrosa ialah gula yang kita kenal sehari-hari, baik yang berasal dari tebu maupun dari bit. Selain pada tebu dan bit, sukrosa terdapat pula pada tumbuhan lain, misalnya dalam buah nanas dan dalam wortel. Dengan hidrolisis sukrosa akan terpecah dan menghasilkan glukosa dan fruktosa. Sukrosa terbentuk dari ikatan glikosida antara karbon nomor 1 pada glukosa dengan karbon nomor 2 pada fruktosa.



Gambar: Sukrosa (berbeda dengan maltosa dan laktosa, ikatan yang menghubungkan kedua monosakarida adalah ikatan C1-2)

## 2. Laktosa

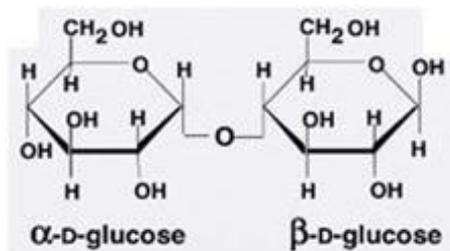
Laktosa merupakan hidrat utama dalam air susu hewan. Laktosa bila dihidrolisis akan menghasilkan D-galaktosa dan D-glukosa, karena itu laktosa adalah suatu disakarida. Ikatan galaktosa dan glukosa terjadi antara atom karbon nomor 1 pada galaktosa dan atom karbon nomor 4 pada glukosa. Oleh karenanya molekul laktosa masih mempunyai gugus -OH glikosidik. Dengan demikian laktosa mempunyai sifat mereduksi dan merotasi.



Gambar:  $\beta$ -laktosa  
(ikatan antara kedua monosakarida merupakan ikatan C1-4)

## 3. Maltosa

Maltosa adalah suatu disakarida yang terbentuk dari dua molekul glukosa. Maltosa terbentuk melalui ikatan glikosida  $\alpha$  antara atom karbon nomor 1 dari glukosa satu dengan atom karbon nomor 4 dari glukosa yang lain. Ikatan yang terjadi ialah antara atom karbon nomor 1 dan atom karbon -nomor 4, oleh karenanya maltosa masih mempunyai gugus -OH glikosidik dan dengan demikian masih mempunyai sifat mereduksi. Maltosa merupakan hasil antara dalam proses, hidrolisis amilum dengan asam maupun dengan enzim.



Gambar:  $\beta$ -maltosa (ikatan antara kedua monosakarida merupakan ikatan C1-4. Atom C nomor 1 yang tak berikatan dengan glukosa lain dalam posisi beta)

## 4. Selobiosa

Selobiosa merupakan unit ulangan dalam selulosa. Selobiosa tersusun dari dua monosakarida glukosa yang berikatan glikosida  $\beta$  antara karbon 1 dengan karbon 4.

## C. POLISAKARIDA

Polisakarida merupakan kelas karbohidrat yang mempunyai lebih daripada delapan unit monosakarida. Pada umumnya polisakarida mempunyai molekul besar dan lebih kompleks daripada monosakarida dan oligosakarida. Polisakarida dapat dihidrolisis menjadi

banyak molekul monosakarida. Polisakarida yang terdiri atas satu macam monosakarida saja disebut homopolisakarida (contohnya kanji, glikogen dan selulosa), sedangkan yang mengandung senyawa lain disebut heteropolisakarida (contohnya heparin).

Rumus kimia polisakarida adalah  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Molekul ini dapat digolongkan menjadi polisakarida struktural seperti selulosa, asam hialuronat, dan sebagainya. Dan polisakarida nutrien seperti amilum (pada tumbuhan dan bakteri), glikogen (hewan), dan paramilum (jenis protozoa).

Umumnya polisakarida berupa senyawa berwarna putih dan tidak berbentuk kristal, tidak mempunyai rasa manis dan tidak mempunyai sifat mereduksi. Berat molekul polisakarida bervariasi dari beberapa ribu hingga lebih dari satu juta. Polisakarida yang dapat larut dalam air akan membentuk larutan koloid. Beberapa polisakarida yang penting di antaranya ialah amilum, glikogen, dekstrin dan selulosa. Amilum polisakarida ini terdapat banyak di alam, yaitu pada sebagian besar tumbuhan. Amilum atau dalam bahasa sehari-hari disebut pati terdapat pada umbi, daun, batang dan biji-bijian.

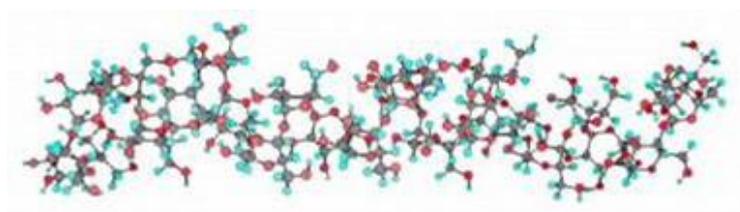
Polisakarida adalah senyawa dalam mana molekul-molekul mengandung banyak satuan monosakarida yang disatukan dengan ikatan glikosida. Polisakarida memenuhi tiga maksud dalam sistem kehidupan sebagai bahan bangunan, bahan makanan dan sebagai zat spesifik. Polisakarida bahan bangunan misalnya selulosa yang memberikan kekuatan pada kayu dan dahan bagi tumbuhan, dan kitin, komponen struktur kerangka luar serangga.

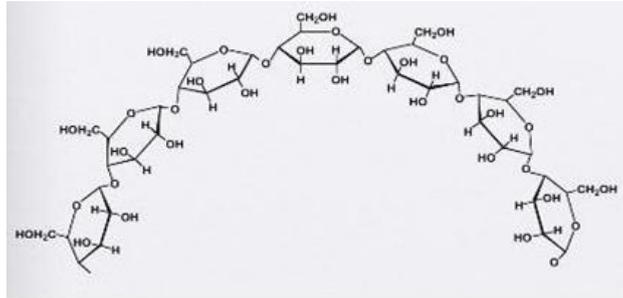
Polisakarida makanan yang lazim adalah pati (starch pada padi dan kentang) dan glikogen pada hewan. Sedangkan polisakarida zat spesifik adalah heparin, satu polisakarida yang mencegah koagulasi darah.

Contoh polisakarida adalah:

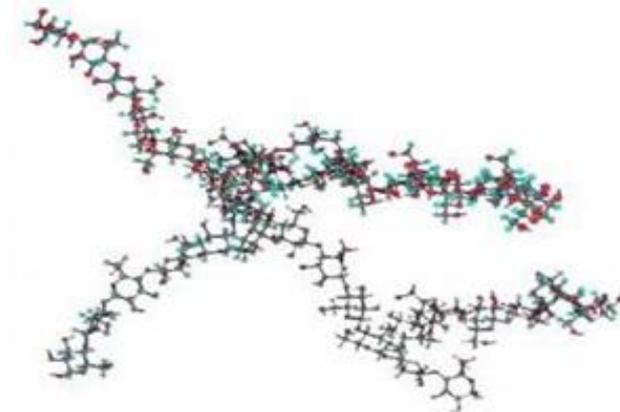
### 1. Amilum

Amilum terdiri dari dua macam polisakarida, yaitu amilosa dan amilopektin. Keduanya merupakan polimer glukosa. Amilosa terdiri atas 250-3000 unit D-glukosa. Sedangkan amilopektin terdiri atas lebih dari 1000 unit glukosa. Unit glukosa amilosa dirangkai dalam bentuk linier oleh ikatan glikosida  $\alpha$  (1 4). Amilosa mempunyai ujung non reduksi dan ujung reduksi. Berat molekulnya bervariasi dari beberapa ratus sampai 150.000. Amilopektin adalah polisakarida bercabang. Dalam molekul ini, rantai pendek dari rangkaian glikosida  $\alpha$  (1 4) unit glukosa digabungkan dengan rangkaian glikosida lain melalui ikatan glikosida  $\alpha$  (1 6).





Gambar: Struktur amilosa (perhatikan bahwa amilosa tidak bercabang)



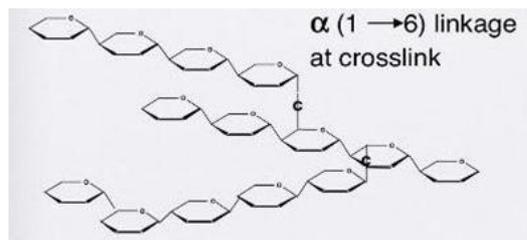
Gambar: Struktur amilopektin (bandingkan dengan amilosa)

## 2. Asam Healuronik

Asam healuronik merupakan mukopolisakarida (heteropolisakarida) yaitu suatu senyawa gelatin dengan berat molekul tinggi. Asam hialuronik disusun oleh unit asam glukuronik dan asetil-glukosamin. Dua monosakarida berbeda tersebut dirangkai oleh ikatan  $\beta(1\ 3)$  untuk membentuk disakarida yang terikat  $\beta(1\ 4)$  dengan unit ulangan berikutnya.

## 3. Glikogen

Glikogen merupakan bentuk cadangan glukosa pada sel-sel hewan dan manusia yang disimpan di hati dan otot sebagai granula. Glikogen merupakan polimer  $\alpha$ -1 dari glukosa dan umumnya mempunyai ikatan cabang  $\alpha$ -1,6 untuk setiap satuan glukosa.

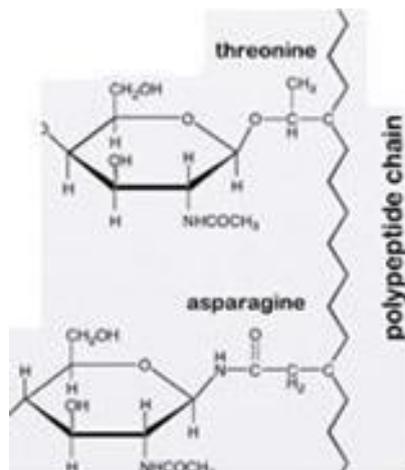


Gambar: Struktur glikogen (bandingkan dengan amilum)

Polisakarida lain yang dihasilkan oleh sel-sel eukariot adalah

### 1. Glikoprotein

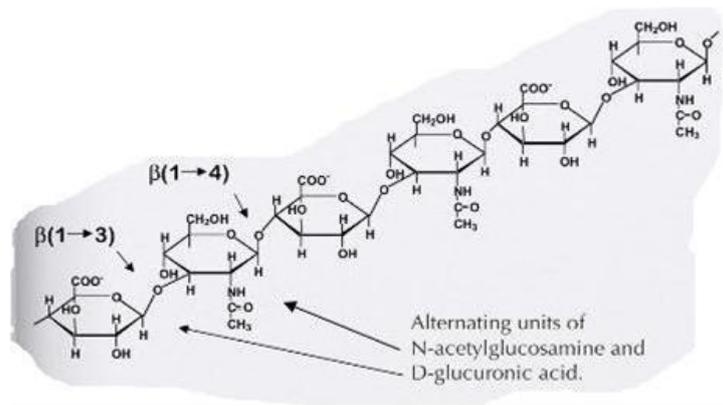
Glikoprotein adalah protein yang mengandung polisakarida. Karbohidrat ini terikat pada protein melalui ikatan glikosidik- ke serin, treonin, hidrosilisin atau hidroksiprolin. Glikoprotein ialah suatu protein yang mengikat unit karbohidrat dengan ikatan kovalen. Struktur ini memainkan beberapa peran penting di antaranya dalam proses proteksi imunologis, pembekuan darah, pengenalan sel-sel, serta interaksi dengan bahan kimia lain.



Gambar: Glikoprotein

### 2. Mukopolisakarida

Proteoglikan atau mukopolisakarida terdiri atas rantai protein dengan polisakarida berulang. Mukopolisakarida adalah suatu materi tipis, kental, menyerupai jelly, dan melapisi sel.



Gambar: Struktur dari mukopolisakarida

### 3. Glikosaminoglikan

Glikosaminoglikan adalah satuan berulang polisakarida proteoglikan tanpa rantai proteinnya.

### 4. Oligosakarida

Oligosakarida ialah kelas karbohidrat yang mengandung dua hingga delapan unit monosakarida. Setiap unit monosakarida ini dihubungkan oleh ikatan glikosida. Oligosakarida dapat digolongkan menjadi kumpulan disakarida, trisakarida, dan seterusnya menurut bilangan unit monosakarida yang terdapat dalam molekulnya.

## D. PERAN DAN FUNGSI KARBOHIDRAT

### 1. Peran Karbohidrat

#### a. Peran dalam biosfer

Fotosintesis menyediakan makanan bagi hampir seluruh kehidupan di bumi, baik secara langsung maupun tidak langsung. Organisme autotrof seperti tumbuhan hijau, bakteri, dan alga fotosintetik memanfaatkan hasil fotosintesis secara langsung. Sementara itu, hampir semua organisme heterotrof, termasuk manusia, benar-benar bergantung pada organisme autotrof untuk mendapatkan makanan.

Pada proses fotosintesis, karbon dioksida diubah menjadi karbohidrat yang kemudian dapat digunakan untuk mensintesis materi organik lainnya. Karbohidrat yang dihasilkan oleh fotosintesis ialah gula berkarbon tiga yang dinamai gliseraldehida 3-fosfat. Senyawa ini merupakan bahan dasar senyawa-senyawa lain yang digunakan langsung oleh organisme autotrof, misalnya glukosa, selulosa, dan pati.

#### b. Peran sebagai bahan bakar dan nutrisi

Karbohidrat menyediakan kebutuhan dasar yang diperlukan tubuh makhluk hidup. Monosakarida, khususnya glukosa, merupakan nutrisi utama sel. Misalnya, pada vertebrata,

glukosa mengalir dalam aliran darah sehingga tersedia bagi seluruh sel tubuh. Sel-sel tubuh tersebut menyerap glukosa dan mengambil tenaga yang tersimpan di dalam molekul tersebut pada proses respirasi selular untuk menjalankan sel-sel tubuh. Selain itu, kerangka karbon monosakarida juga berfungsi sebagai bahan baku untuk sintesis jenis molekul organik kecil lainnya, termasuk asam amino dan asam lemak.

Selain sebagai sumber energi, karbohidrat juga berfungsi untuk menjaga keseimbangan asam basa di dalam tubuh dan berperan penting dalam proses metabolisme dalam tubuh, serta pembentuk struktur sel dengan mengikat protein dan lemak.

*c. Peran sebagai cadangan energi*

Beberapa jenis polisakarida berfungsi sebagai materi simpanan atau cadangan, yang nantinya akan dihidrolisis untuk menyediakan gula bagi sel ketika diperlukan. Pati merupakan suatu polisakarida simpanan pada tumbuhan. Tumbuhan menumpuk pati sebagai granul atau butiran di dalam organel plastid, termasuk kloroplas. Dengan mensintesis pati, tumbuhan dapat menimbun kelebihan glukosa. Glukosa merupakan bahan bakar sel yang utama, sehingga pati merupakan energi cadangan.

Sementara itu, hewan menyimpan polisakarida yang disebut glikogen. Manusia dan vertebrata lainnya menyimpan glikogen terutama dalam sel hati dan otot. Penguraian glikogen pada sel-sel ini akan melepaskan glukosa ketika kebutuhan gula meningkat. Namun demikian, glikogen tidak dapat diandalkan sebagai sumber energi hewan untuk jangka waktu lama. Glikogen simpanan akan terkuras habis hanya dalam waktu sehari kecuali kalau dipulihkan kembali dengan mengonsumsi makanan.

*d. Peran sebagai materi pembangun*

Organisme membangun materi-materi kuat dari polisakarida struktural. Misalnya, selulosa ialah komponen utama dinding sel tumbuhan. Selulosa bersifat seperti serabut, liat, tidak larut di dalam air, dan ditemukan terutama pada tangkai, batang, dahan, dan semua bagian berkayu dari jaringan tumbuhan. Kayu terutama terbuat dari selulosa dan polisakarida lain, misalnya hemiselulosa dan pektin. Sementara itu, kapas terbuat hampir seluruhnya dari selulosa.

Polisakarida struktural penting lainnya ialah kitin, karbohidrat yang menyusun kerangka luar (eksoskeleton) arthropoda (serangga, laba-laba, crustacea, dan hewan-hewan lain sejenis). Kitin murni mirip seperti kulit, tetapi akan mengeras ketika dilapisi kalsium karbonat. Kitin juga ditemukan pada dinding sel berbagai jenis fungi. Sementara itu, dinding sel bakteri terbuat dari struktur gabungan karbohidrat polisakarida dengan peptida, disebut peptidoglikan. Dinding sel ini membentuk suatu kulit kaku dan berpori membungkus sel yang memberi perlindungan fisik bagi membran sel yang lunak dan sitoplasma di dalam sel.

Karbohidrat struktural lainnya yang juga merupakan molekul gabungan karbohidrat dengan molekul lain ialah proteoglikan, glikoprotein, dan glikolipid. Proteoglikan maupun glikoprotein terdiri atas karbohidrat dan protein, namun proteoglikan terdiri terutama atas karbohidrat, sedangkan glikoprotein terdiri terutama atas protein. Proteoglikan ditemukan misalnya pada perekat antarsel pada jaringan, tulang rawan, dan cairan sinovial yang

melicinkan sendi otot. Sementara itu, glikoprotein dan glikolipid (gabungan karbohidrat dan lipid) banyak ditemukan pada permukaan sel hewan. Karbohidrat pada glikoprotein umumnya berupa oligosakarida dan dapat berfungsi sebagai penanda sel. Misalnya, empat golongan darah manusia pada sistem ABO (A, B, AB, dan O) mencerminkan keragaman oligosakarida pada permukaan sel darah merah.

## 2. Fungsi Karbohidrat

Fungsi utama karbohidrat sebagai sumber energi ( 1 gram karbohidrat menghasilkan 4 kalori ) bagi kebutuhan sel-sel jaringan tubuh. Sebagian dari karbohidrat diubah langsung menjadi energi untuk aktifitas tubuh, dan sebagian lagi disimpan dalam bentuk glikogen di hati dan otot. Ada beberapa jaringan tubuh seperti sistem syaraf dan eritrosit hanya dapat menggunakan energi yang berasal dari karbohidrat saja.

1. Menjaga dan mempertahankan kerja sel-sel otak, dan lensa mata.
2. Mengatur proses metabolisme tubuh.
3. Menjaga keseimbangan asam dan basa.
4. Membentuk struktur sel, jaringan dan organ tubuh.
5. Membantu penyerapan kalsium khusus karbohidrat dari jenis laktosa.
6. Melindungi protein agar tidak terbakar sebagai penghasil energi.
7. Membantu metabolisme lemak dan protein, dengan demikian dapat mencegah terjadinya ketosis dan pemecahan protein yang berlebihan.
8. Di dalam hepar berfungsi untuk detoksifikasi zat-zat toksik tertentu.
9. Beberapa jenis karbohidrat mempunyai fungsi khusus di dalam tubuh. Ribosa merupakan komponen yang penting dalam asam nukleat.
10. Selain itu beberapa golongan karbohidrat yang tidak dapat dicerna, mengandung serat (*dietary fiber*) berguna untuk pencernaan, seperti selulosa, pektin dan lignin.

## 2. Beberapa Sifat Kimia Karbohidrat

### a. Sifat Mereduksi

Monosakarida dan beberapa disakarida mempunyai sifat dapat mereduksi terutama dalam suasana basa. Sifat sebagai reduktor ini dapat digunakan untuk keperluan identifikasi karbohidrat maupun analisis kuantitatif. Sifat mereduksi ini disebabkan oleh adanya gugus aldehida atau keton bebas dalam molekul karbohidrat. Sifat ini tampak pada reaksi reduksi ion-ion logam misalnya ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan ion  $\text{Ag}^+$  yang terdapat pada pereaksi-pereaksi tertentu

### b. Pembentukan Furfural

Dalam larutan asam yang encer, walaupun dipanaskan, monosakarida umumnya stabil. Tetapi apabila dipanaskan dengan asam kuat yang pekat, monosakarida menghasilkan furfural atau derivatnya. Reaksi pembentukan furfural ini adalah reaksi dehidrasi atau pelepasan molekul air dari suatu senyawa.

Pentosa-pentosa hampir secara kuantitatif semua terdehidrasi menjadi furfural. Dengan dehidrasi heksosa-heksosa menghasilkan hidrosimetilfurfural. Oleh karena furfural

dan derivatnya dapat membentuk senyawa yang berwarna apabila direaksikan dengan naftol atau timol, reaksi ini dapat digunakan sebagai reaksi pengenalan karbohidrat.

*c. Pembentukan Osazon*

Semua karbohidrat yang mempunyai gugus aldehid atau keton bebas akan membentuk osazon bila dipanaskan bersama fenilhidrazina berlebih. Osazon yang terjadi mempunyai bentuk kristal dan titik lebur yang khas bagi masing-masing karbohidrat. Hal ini sangat penting karena dapat digunakan untuk mengidentifikasi karbohidrat dan merupakan salah satu cara untuk membedakan beberapa monosakarida, misalnya antara glukosa dan galaktosa yang terdapat dalam urine wanita dalam masa menyusui.

*d. Pembentukan Ester*

Adanya gugus hidroksil pada karbohidrat memungkinkan terjadinya ester apabila direaksikan dengan asam. Monosakarida mempunyai beberapa gugus -OH dan dengan asam fosfat. Ester yang penting dalam tubuh kita adalah  $\alpha$  - D glukosa-6-fosfat dan -D-fruktosa-1,6-difosfat. Kedua jenis ester ini terjadi dari reaksi monosakarida dengan adenosintrifosfat (ATP) dengan bantuan enzim tertentu dalam tubuh kita. Proses esterifikasi dengan asam fosfat yang berlangsung dalam tubuh kita disebut juga proses fosforilasi. Pada glukosa dan fruktosa, gugus fosfat dapat terikat pada atom karbon nomor 1,2,3,4 atau 6. Pada  $\alpha$  - D glukosa-6-fosfat, gugus fosfat terikat pada atom nomor 6, sedangkan pada  $\alpha$  -D-fruktosa-1,6-difosfat dua gugus fosfat terikat pada atom karbon nomor 1 dan 6.

*e. Isomerisasi*

Kalau dalam larutan asam encer monosakarida dapat stabil, tidak demikian halnya apabila monosakarida dilarutkan dalam basa encer. Glukosa dalam larutan basa encer akan berubah sebagai menjadi fruktosa dan manosa. Ketiga monosakarida ini ada dalam keadaan keseimbangan. Demikian pula apabila yang dilarutkan itu fruktosa atau manosa, keseimbangan antara ketiga monosakarida akan tercapai juga. Reaksi ini dikenal sebagai transformasi Lobry de Bruon van Eckenstein yang berlangsung melalui proses enosisasi.

*f. Pembentukan Glikosida*

Apabila glukosa direaksikan dengan metil alkohol, menghasilkan dua senyawa. Kedua senyawa ini dapat dipisahkan satu dari yang lain dan keduanya tidak memiliki sifat aldehid. Keadaan ini membuktikan bahwa yang menjadi pusat reaksi adalah gugus -OH yang terikat pada atom karbon nomor 1. Senyawa yang terbentuk adalah suatu asetal dan disebut secara umum glikosida. Ikatan yang terjadi antara gugus metil dengan monosakarida disebut ikatan glikosida dan gugus -OH yang bereaksi disebut gugus -OH glikosidik.

*g. Rumus Fischer*

Seperti senyawa organik lainnya, molekul karbohidrat terbentuk dari rantai atom karbon dan tiap atom karbon mengikat atau gugus tertentu. Apabila atom karbon mengikat empat buah atom atau gugus, maka terbentuk sudut antara dua ikatan yang besarnya 109<sup>o</sup>C

## LATIHAN

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

- 1) Jelaskan fungsi karbohidrat sebagai pereduksi !
- 2) Jelaskan fungsi karbohidrat sebagai pembentukan glikosida
- 3) Jelaskan yang dimaksud dengan Oligosakarida !

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Monosakarida dan beberapa disakarida mempunyai sifat dapat mereduksi terutama dalam suasana basa. Sifat sebagai reduktor ini dapat digunakan untuk keperluan identifikasi karbohidrat maupun analisis kuantitatif. Sifat mereduksi ini disebabkan oleh adanya gugus aldehida atau keton bebas dalam molekul karbohidrat. Sifat ini tampak pada reaksi reduksi ion-ion logam misalnya ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan ion  $\text{Ag}^+$  yang terdapat pada pereaksi-pereaksi tertentu
- 2) Apabila glukosa direaksikan dengan metil alkohol, menghasilkan dua senyawa. Kedua senyawa ini dapat dipisahkan satu dari yang lain dan keduanya tidak memiliki sifat aldehyd. Keadaan ini membuktikan bahwa yang menjadi pusat reaksi adalah gugus  $-\text{OH}$  yang terikat pada atom karbon nomor 1. Senyawa yang terbentuk adalah suatu asetal dan disebut secara umum glikosida. Ikatan yang terjadi antara gugus metil dengan monosakarida disebut ikatan glikosida dan gugus  $-\text{OH}$  yang bereaksi disebut gugus  $-\text{OH}$  glikosidik.
- 3) Oligosakarida ialah kelas karbohidrat yang mengandung dua hingga delapan unit monosakarida. Setiap unit monosakarida ini dihubungkan oleh ikatan glikosida. Oligosakarida dapat digolongkan menjadi kumpulan disakarida, trisakarida, dan seterusnya menurut bilangan unit monosakarida yang terdapat dalam molekulnya.

## RINGKASAN

Biomolekul adalah molekul/senyawa kimia yang berperan dalam sistem kehidupan. Sebagian berukuran kecil/mikromolekul dan sebagian lagi berukuran besar/makromolekul. Karbohidrat termasuk golongan biomakromolekul.

Berdasarkan jumlah monomernya, karbohidrat dibagi menjadi tiga golongan besar yaitu monosakarida (senyawa karbohidrat yang tidak dapat diuraikan lagi menjadi senyawa karbohidrat yang lebih sederhana, oligosakarida (senyawa karbohidrat yang jika dihidrolisis akan menghasilkan beberapa molekul monosakarida) dan polisakarida (senyawa karbohidrat yang tersusun dari banyak residu monosakarida).

Rumus bangun karbohidrat dapat digambarkan/ditulisakan dengan berbagai cara seperti proyeksi Fischer dan Hawort. Sifat dari beberapa senyawa karbohidrat memiliki sifat daya reduksi yang disebabkan oleh gugus aldehida bebas di dalam molekulnya, sedangkan ketosa tidak memiliki daya reduksi.

## TES 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Karbohidrat adalah senyawa-senyawa:
  - A. Polihidroksi aldehyd atau polihidroksiketone
  - B. Polimer dari asam amino
  - C. Senyawa-senyawa yang mudah larut dalam air tetapi sukar larut dalam pelarut organik
  - D. Senyawa - senyawa yang sukar larut dalam air tetapi mudah larut dalam pelarut organik
  
- 2) Ikatan yang menghubungkan monomer-monomer dalam molekul polisakarida disebut ikatan:
  - A. Kovalen
  - B. Glikosidik
  - C. Hidrogen
  - D. Peptida
  
- 3) Di antara senyawa-senyawa berikut ini yang merupakan ketosa adalah:
  - A. Fruktosa
  - B. Maltosa
  - C. Glukosa
  - D. Laktosa
  
- 4) Sebuah disakarida ketika dihidrolisis menghasilkan satu macam monosakarida yaitu glukosa. Disakarida tersebut adalah:
  - A. Sukrosa
  - B. Maltosa
  - C. Laktosa
  - D. Glukosa
  
- 5) Pada molekul amilosa, ikatan glikosidik yang menghubungkan monomer-monomernya adalah ikatan:
  - A. Glikosidik alfa-1,4
  - B. Glikosidik beta-1,4
  - C. Glikosidik alfa-1,6
  - D. Glikosidik beta-1,1
  
- 6) Laktosa adalah senyawa disakarida yang tersusun oleh:

- A. Glukosa dan fruktosa
  - B. Glukosa dan galaktosa
  - C. Galaktosa dan fruktosa
  - D. Dua residu glukosa
- 7) Senyawa karbohidrat cadangan yang terdapat dalam tumbuh-tumbuhan adalah;
- A. Glikogen
  - B. Amilum
  - C. Glukosa
  - D. Laktosa
- 8) Pati adalah polisakarida yang banyak terdapat dalam tumbuh-tumbuhan dan berperan sebagai cadangan energi. Monomer yang menyusun molekul-molekul pati adalah:
- A. Karbohidrat
  - B. Asam amino
  - C. Glukosa
  - D. Sukrosa
- 9) Yang disebut gula darah adalah:
- A. Glukosa
  - B. Fruktosa
  - C. Sukrosa
  - D. Glikogen
- 10) Senyawa pentosa yang merupakan komponen dari RNA adalah:
- A. Glikogen
  - B. Glukosa
  - C. Ribosa
  - D. 2-deoksiribosa

## Topik 2

### Metabolisme Karbohidrat

Metabolisme adalah reaksi atau perubahan kimia yang terjadi pada senyawa-senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup. Berbagai senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup seperti karbohidrat secara dinamis sebagai sumber energi akan dipecah untuk menghasilkan energi, sebaliknya berbagai senyawa bermolekul kecil akan dirangkaikan dalam jalur biosintesis untuk menghasilkan berbagai jenis molekul yang diperlukan tubuh.

Metabolisme adalah reaksi atau perubahan kimiawi yang terjadi pada senyawa-senyawa yang terdapat di dalam tubuh makhluk hidup. Karbohidrat adalah salah satu biomolekul sumber energi yang utama. Karbohidrat diserap dari saluran pencernaan dalam bentuk monosakarida, terutama sebagai glukosa, fruktosa, dan galaktosa. Senyawa-senyawa monosakarida tersebut sebagian akan langsung digunakan oleh sel sebagai sumber energi, diproses dalam glikolisis menjadi piruvat, lalu diubah menjadi asetil Ko-A melalui reaksi dekarboksilasi oksidatif dan dioksidasi sempurna dalam siklus Krebs menjadi CO<sub>2</sub> dan menghasilkan banyak energi.

Sebagian senyawa-senyawa monosakarida akan dibawa ke hati dan diubah menjadi glikogen dalam satu jalur biokimia yang disebut glikogenesis. Glikogen yang terbentuk segera dihidrolisis kembali menjadi glukosa untuk menstabilkan kadar glukosa darah dan menyediakan bahan sumber energi bagi sel tubuh. Proses hidrolisis glikogen menjadi glukosa disebut glikogenolisis.

Glukosa yang terbentuk lalu diangkut ke seluruh sel-sel tubuh dan dikatabolisme untuk menghasilkan energi. Proses oksidasi glukosa menjadi CO<sub>2</sub> hanya dapat berlangsung dalam keadaan aerob. Keadaan anaerob, asam piruvat diubah menjadi asam laktat, dan dapat diubah kembali menjadi asam piruvat apabila keadaan menjadi aerob kembali.

Asam piruvat merupakan substrat untuk berbagai jalur metabolisme. Selain diubah menjadi asetil Ko-A, sebagian asam piruvat juga dapat diubah menjadi glukosa dalam jalur glikoneogenesis yaitu jalur pembentukan glukosa dari bahan-bahan bukan karbohidrat.

Peristiwa yang dialami unsur-unsur makanan setelah dicerna dan diserap adalah metabolisme intermediet. Jadi, metabolisme intermediet mencakup suatu bidang luas yang berupaya memahami bukan saja lintasan metabolik yang dialami oleh masing-masing molekul, tetapi juga interelasi dan mekanisme yang mengatur arus metabolit melewati lintasan tersebut.

Lintasan metabolisme dapat digolongkan menjadi 3 kategori:

1. Lintasan anabolik (penyatuan/pembentukan)  
Ini merupakan lintasan yang digunakan pada sintesis senyawa pembentuk struktur dan mesin tubuh. Salah satu contoh dari kategori ini adalah sintesis protein.

2. Lintasan katabolik (pemecahan)  
Lintasan ini meliputi berbagai proses oksidasi yang melepaskan energi bebas, biasanya dalam bentuk fosfat energi tinggi atau unsur ekuivalen pereduksi, seperti rantai respirasi dan fosforilasi oksidatif.
3. Lintasan amfibolik (persimpangan)  
Lintasan ini memiliki lebih dari satu fungsi dan terdapat pada persimpangan metabolisme sehingga bekerja sebagai penghubung antara lintasan anabolik dan lintasan katabolik. Contoh dari lintasan ini adalah siklus asam sitrat.

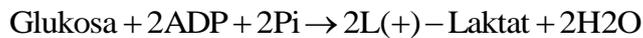
## A. GLIKOLISIS

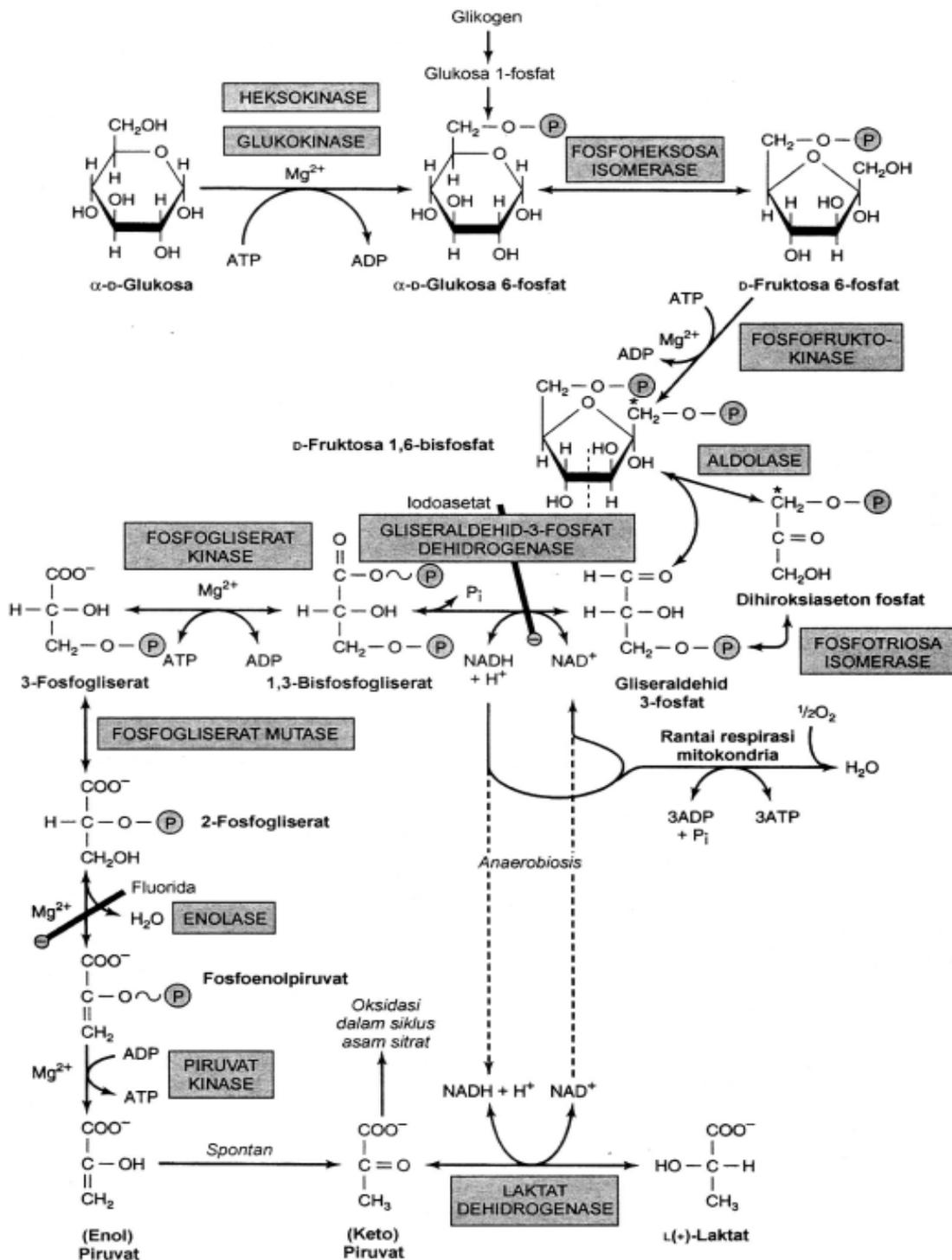
Glikolisis berlangsung di dalam sitosol semua sel. Lintasan katabolisme ini adalah proses pemecahan glukosa menjadi:

1. asam piruvat, pada suasana aerob (tersedia oksigen)
2. asam laktat, pada suasana anaerob (tidak tersedia oksigen)

Glikolisis merupakan jalur utama metabolisme glukosa agar terbentuk asam piruvat, dan selanjutnya asetil-KoA untuk dioksidasi dalam siklus asam sitrat (Siklus Krebs's). Selain itu glikolisis juga menjadi lintasan utama metabolisme fruktosa dan galaktosa.

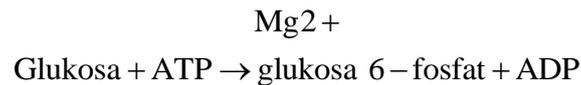
Keseluruhan persamaan reaksi untuk glikolisis yang menghasilkan laktat adalah:



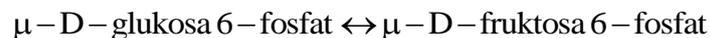


Secara rinci, tahap-tahap dalam lintasan glikolisis adalah sebagai berikut (*pada setiap tahap, lihat dan hubungkan dengan Gambar Lintasan detail metabolisme karbohidrat*):

1. **Glukosa** masuk lintasan glikolisis melalui fosforilasi menjadi **glukosa-6 fosfat** dengan dikatalisir oleh enzim **heksokinase** atau **glukokinase** pada sel parenkim hati dan sel Pulau Langerhans pancreas. Proses ini memerlukan **ATP** sebagai donor fosfat. ATP bereaksi sebagai kompleks Mg-ATP. Terminal fosfat berenergi tinggi pada ATP digunakan, sehingga hasilnya adalah **ADP. (-1P)** Reaksi ini disertai kehilangan energi bebas dalam jumlah besar berupa kalor, sehingga dalam kondisi fisiologis dianggap irreversibel. Heksokinase dihambat secara alosterik oleh produk reaksi glukosa 6-fosfat.



2. **Glukosa 6-fosfat** diubah menjadi **Fruktosa 6-fosfat** dengan bantuan enzim fosfoheksosa isomerase dalam suatu reaksi isomerasi aldosa-ketosa. Enzim ini hanya bekerja pada anomer  $\mu$ -glukosa 6-fosfat.



3. **Fruktosa 6-fosfat** diubah menjadi **Fruktosa 1,6-bifosfat** dengan bantuan enzim fosfofruktokinase. Fosfofruktokinase merupakan enzim yang bersifat alosterik sekaligus bisa diinduksi, sehingga berperan penting dalam laju glikolisis. Dalam kondisi fisiologis tahap ini bisa dianggap irreversible. Reaksi ini memerlukan **ATP** sebagai donor fosfat, sehingga hasilnya adalah **ADP.(-1P)**



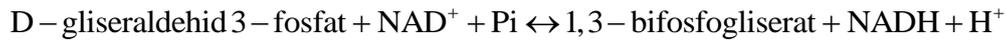
4. **Fruktosa 1,6-bifosfat** dipecah menjadi 2 senyawa triosa fosfat yaitu **gliseraldehid 3-fosfat** dan **dihidroksi aseton fosfat**. Reaksi ini dikatalisir oleh enzim **aldolase** (fruktosa 1,6-bifosfat aldolase).



5. **Gliseraldehid 3-fosfat** dapat berubah menjadi **dihidroksi aseton fosfat** dan sebaliknya (reaksi interkonversi). Reaksi bolak-balik ini mendapatkan katalisator enzim **fosfotriosa isomerase**.



6. Glikolisis berlangsung melalui oksidasi **Gliseraldehid 3-fosfat** menjadi **1,3-bifosfoglisarat**, dan karena aktivitas enzim fosfotriosa isomerase, senyawa dihidroksi aseton fosfat juga dioksidasi menjadi 1,3-bifosfoglisarat melewati gliseraldehid 3-fosfat.



Enzim yang bertanggung jawab terhadap oksidasi di atas adalah **gliseraldehid 3-fosfat dehidrogenase**, suatu enzim yang bergantung kepada NAD. Atom-atom hidrogen yang dikeluarkan dari proses oksidasi ini dipindahkan kepada NAD<sup>+</sup> yang terikat pada enzim. Pada rantai respirasi mitokondria akan dihasilkan tiga fosfat berenergi tinggi (+3P).

Catatan:

Karena **fruktosa 1,6-bifosfat yang memiliki 6 atom C** dipecah menjadi **Gliseraldehid 3-fosfat dan dihidroksi aseton fosfat** yang masing-masing **memiliki 3 atom C**, dengan demikian terbentuk 2 molekul gula yang masing-masing beratom C tiga (triosa). Jika molekul dihidroksi aseton fosfat juga berubah menjadi 1,3-bifosfogliserat, maka dari 1 molekul glukosa pada bagian awal, sampai dengan tahap ini akan menghasilkan 2 x 3P = 6P. **(+6P)**

7. Energi yang dihasilkan dalam proses oksidasi disimpan melalui pembentukan ikatan sulfur berenergi tinggi, setelah fosforolisis, sebuah gugus fosfat berenergi tinggi dalam posisi 1 senyawa **1,3 bifosfogliserat**. Fosfat berenergi tinggi ini ditangkap menjadi **ATP** dalam reaksi lebih lanjut dengan **ADP**, yang dikatalisir oleh enzim **fosfogliserat kinase**. Senyawa sisa yang dihasilkan adalah **3-fosfogliserat**.  $1,3\text{-bifosfogliserat} + \text{ADP} \leftrightarrow 3\text{-fosfogliserat} + \text{ATP}$

Catatan:

Karena ada dua molekul 1,3-bifosfogliserat, maka energi yang dihasilkan adalah 2 x 1P = 2P. **(+2P)**

8. **3-fosfogliserat** diubah menjadi **2-fosfogliserat** dengan dikatalisir oleh enzim **fosfogliserat mutase**. Senyawa 2,3-bifosfogliserat (difosfogliserat, DPG) merupakan intermediate dalam reaksi ini.  $3\text{-fosfogliserat} \leftrightarrow 2\text{-fosfogliserat}$
9. **2-fosfogliserat** diubah menjadi **fosfoenol piruvat (PEP)** dengan bantuan enzim enolase. Reaksi ini melibatkan dehidrasi serta pendistribusian kembali energi di dalam molekul, menaikkan valensi fosfat dari posisi 2 ke status berenergi tinggi. **Enolase dihambat oleh fluoride**, suatu unsur yang dapat digunakan jika glikolisis di dalam darah perlu dicegah sebelum kadar glukosa darah diperiksa. Enzim ini bergantung pada keberadaan  $\text{Mg}^{2+}$  atau  $\text{Mn}^{2+}$ .

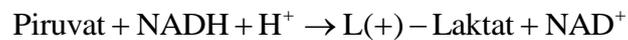


10. Fosfat berenergi tinggi **PEP** dipindahkan pada **ADP** oleh enzim **piruvat kinase** sehingga menghasilkan **ATP**. Enol piruvat yang terbentuk dalam reaksi ini mengalami konversi spontan menjadi keto piruvat. Reaksi ini disertai kehilangan energi bebas dalam jumlah besar sebagai panas dan secara fisiologis adalah irreversible. Fosfoenol piruvat + ADP → piruvat + ATP

Catatan:

Karena ada 2 molekul PEP maka terbentuk 2 molekul enol piruvat sehingga total hasil energi pada tahap ini adalah  $2 \times 1P = 2P$ . (+2P)

11. Jika keadaan bersifat **anaerob (tak tersedia oksigen)**, reoksidasi NADH melalui pemindahan sejumlah unsur ekuivalen pereduksi akan dicegah. Piruvat akan direduksi oleh **NADH** menjadi **laktat**. Reaksi ini dikatalisir oleh enzim **laktat dehidrogenase**.



Dalam keadaan **aerob**, **piruvat** diambil oleh mitokondria, dan setelah konversi menjadi **asetil-KoA**, akan dioksidasi menjadi **CO<sub>2</sub>** melalui **siklus asam sitrat (Siklus Kreb's)**. Ekuivalen pereduksi dari reaksi  $\text{NADH} + \text{H}^+$  yang terbentuk dalam glikolisis akan diambil oleh mitokondria untuk oksidasi melalui salah satu dari reaksi ulang alik (shuttle).

Kesimpulan:

**Pada glikolisis aerob**, energi yang dihasilkan terinci sebagai berikut:

- hasil tingkat substrat	: + 4P
- hasil oksidasi respirasi	: + 6P
- jumlah	: +10P
- dikurangi untuk aktivasi glukosa dan fruktosa 6P	: <u>- 2P</u>
	+ 8P

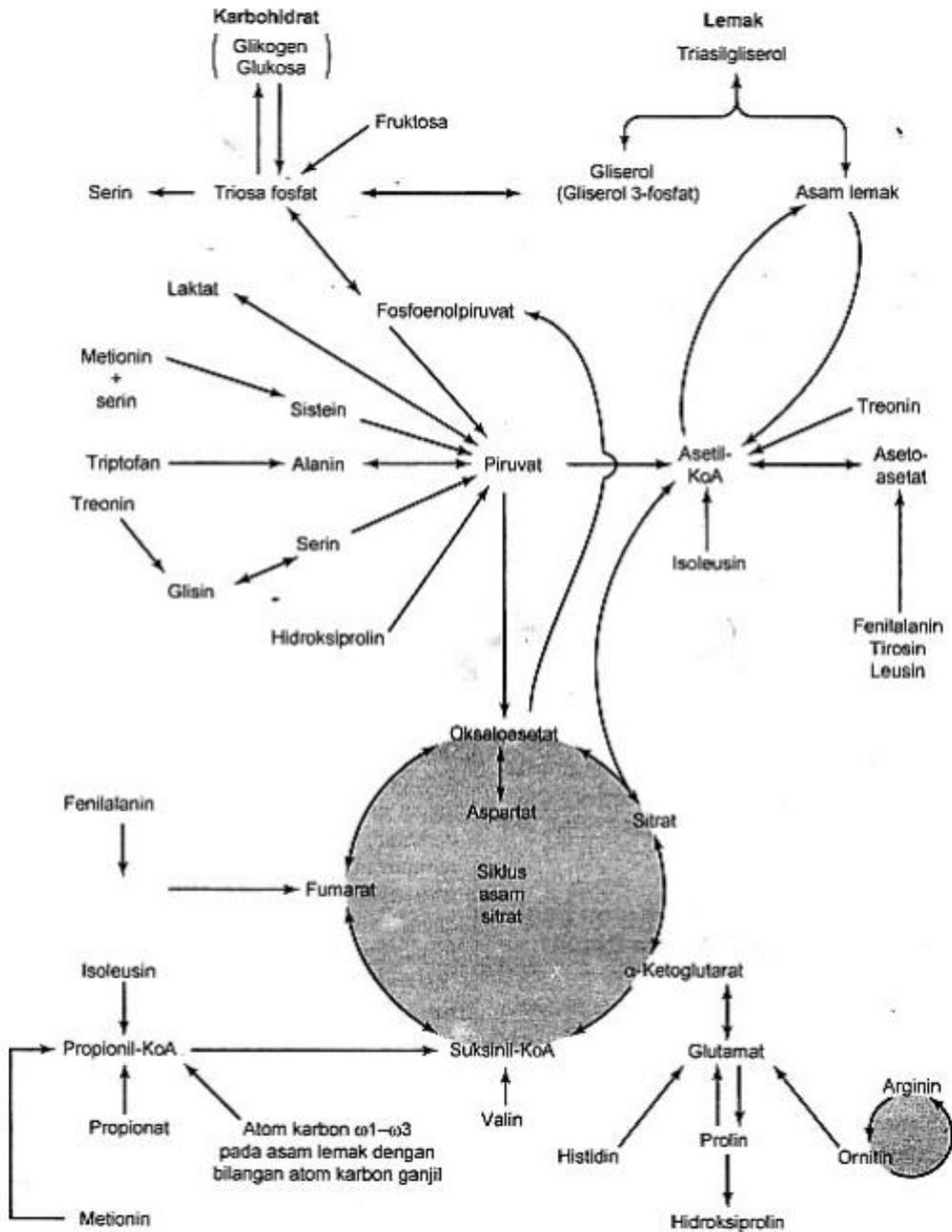
**Pada glikolisis anaerob**, energi yang dihasilkan terinci sebagai berikut:

- hasil tingkat substrat	: + 4P
- hasil oksidasi respirasi	: + 0P
- jumlah	: + 4P
- dikurangi untuk aktivasi glukosa dan fruktosa 6P	: <u>- 2P</u>
	+ 2P

### **Siklus Krebs (Siklus Asam Sitrat)**

Siklus diawali dengan reaksi antara gugus asetil KoA dan asam karboksilat empat-karbon oksaloasetat yang membentuk asam trikarboksilat enam-karbon, yaitu sitrat. Pada reaksi-reaksi berikutnya, terjadi pembebasan dua molekul CO<sub>2</sub> dan pembentukan ulang oksaloasetat (Gambar 1.1). Hanya sejumlah kecil oksaloasetat yang dibutuhkan untuk

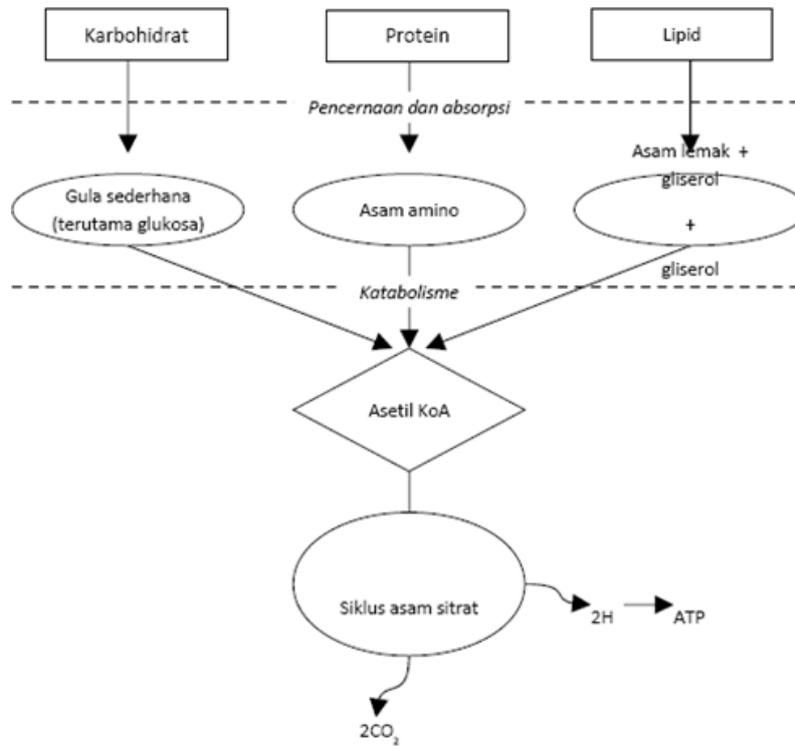
mengoksidasi asetil-KoA dalam jumlah besar; senyawa ini dapat dianggap memiliki peran katalitik.



*Siklus asam sitrat sebagai lintasan amfibolik dalam metabolisme (perhatikan jalur persimpangan jalur katabolisme dan anabolisme) (dipetik dari: Murray dkk. Biokimia Harper)*

Secara berurutan, glukosa, asam lemak serta gliserol dan asam amino dalam pencernaan diproses melalui lintasan metaboliknya masing-masing menjadi suatu produk

umum yaitu Asetil KoA, yang kemudian akan dioksidasi secara sempurna melalui siklus asam sitrat.



*Ilustrasi skematis dari lintasan metabolik dasar*

*Gambar 2.22. Ilustrasi skematis dari lintasan metabolik dasar*

Terdapat beberapa jalur metabolisme karbohidrat, baik yang tergolong sebagai katabolisme maupun anabolisme, yaitu glikolisis, oksidasi piruvat, siklus asam sitrat, glikogenesis, glikogenolisis serta glukoneogenesis. Secara ringkas, jalur-jalur metabolisme karbohidrat dijelaskan sebagai berikut:

- Glukosa sebagai bahan bakar utama akan mengalami glikolisis (dipecah) menjadi 2 piruvat jika tersedia oksigen. Dalam tahap ini dihasilkan energi berupa ATP.
- Selanjutnya masing-masing piruvat dioksidasi menjadi asetil KoA. Dalam tahap ini dihasilkan energi berupa ATP.
- Asetil KoA akan masuk ke jalur persimpangan yaitu siklus asam sitrat. Dalam tahap ini dihasilkan energi berupa ATP.
- Jika sumber glukosa berlebihan, melebihi kebutuhan energi kita maka glukosa tidak dipecah, melainkan akan dirangkai menjadi polimer glukosa (disebut glikogen). Glikogen ini disimpan di hati dan otot sebagai cadangan energi jangka pendek. Jika kapasitas penyimpanan glikogen sudah penuh maka karbohidrat harus dikonversi menjadi jaringan lipid sebagai cadangan energi jangka panjang.

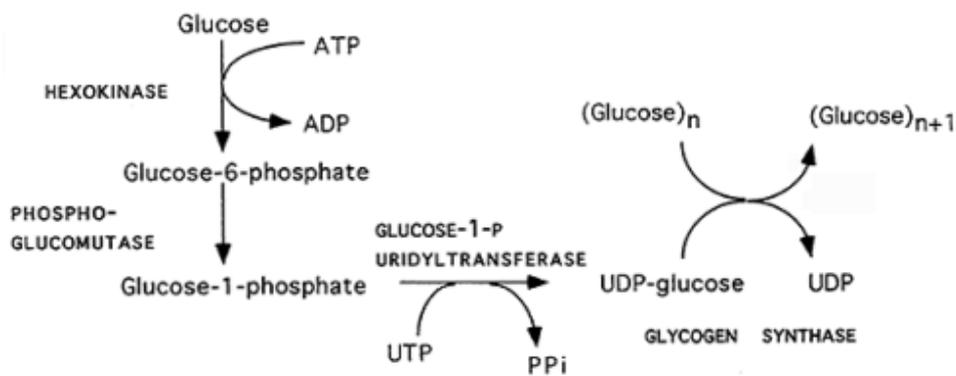
- e. Jika terjadi kekurangan glukosa dari diet sebagai sumber energi, maka glikogen dipecah menjadi glukosa. Selanjutnya, glukosa mengalami glikolisis, diikuti dengan oksidasi piruvat sampai dengan siklus asam sitrat.
- f. Jika glukosa dari diet tak tersedia dan cadangan glikogenpun juga habis, maka sumber energi non karbohidrat yaitu lipid dan protein harus digunakan. Jalur ini dinamakan glukoneogenesis (pembentukan glukosa baru) karena dianggap lipid dan protein harus diubah menjadi glukosa baru yang selanjutnya mengalami katabolisme untuk memperoleh energi.

## B. GLIKOGENESIS

Glikogenesis adalah proses pembentukan atau biosintesis glikogen yang terjadi terutama di dalam hati dan otot. Glikogen atau gula otot merupakan cadangan makanan yang dibentuk dari molekul glukosa hasil pencernaan makanan. Glukosa akan saling berikatan dengan ikatan  $\alpha$  1-4 glikosidik untuk membentuk glikogen. Molekul glikogen tersusun bercabang-cabang agar dapat tersimpan maksimal di dalam sel.

Kelebihan kadar glukosa di dalam darah akan memicu disekresikannya hormon insulin untuk memicu terjadinya glikogenesis. Glikogen ini dapat dipecah lagi menjadi glukosa saat kadar glukosa darah menurun seperti dalam keadaan lapar atau puasa.

Glikogenesis terjadi dengan cara penambahan molekul glukosa pada rantai glikogen yang telah ada (disebut sebagai glikogen primer). Penambahan glukosa akan terjadi secara bertahap, satu demi satu molekul glukosa akan memperpanjang glikogen yang telah ada.



Gambar 2.23. Sintesis glikogen melalui glikogenesis

**Proses glikogenesis di dalam tubuh adalah sebagai berikut.**

- Fosforilasi glukosa oleh ATP menjadi glukosa 6-fosfat, dikatalisis oleh enzim glukokinase/hexokinase.
- Berikutnya glukosa 6-fosfat mengalami reaksi isomerasi menjadi glukosa 1-fosfat, dikatalisis oleh enzim fosfoglukomutase.

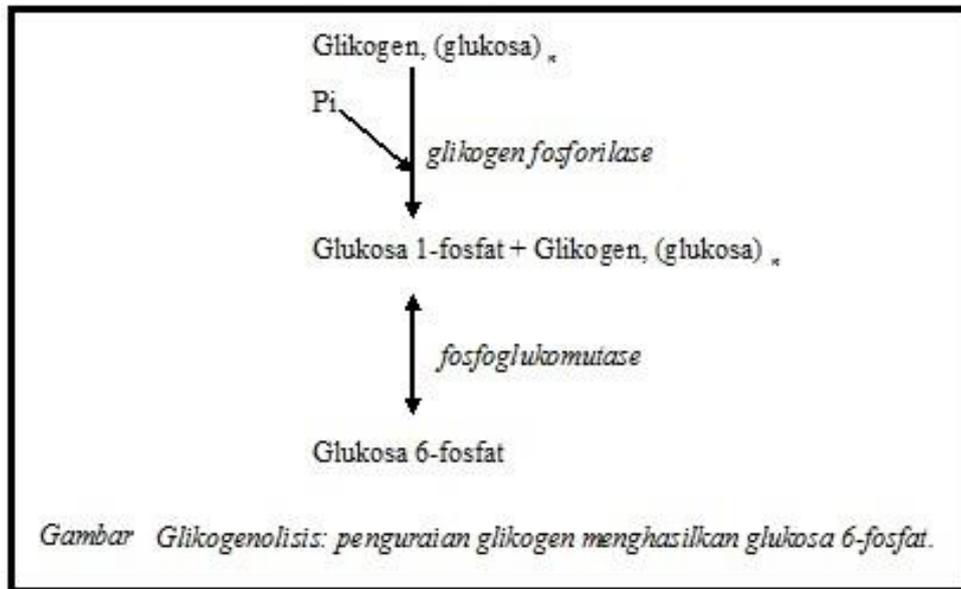
- Glukosa 1-fosfat bereaksi dengan uridin tri phosphate (UDP) menjadi uridil di phosphate glukosa (UDP-glukosa), dikatalisis oleh enzim glukosa 1-fosfat uridil transferase.
- UDP-glukosa kemudian akan diikatkan pada rantai glikogen yang sudah ada, dikatalisis oleh enzim glikogen sintase. Dalam proses ini, atom C pertama dari UDP-glukosa diikatkan ke atom C keempat yang ada pada rantai glikogen primer dan membentuk ikatan  $\alpha$  1-4 glikosidik.
- Berikutnya enzim pembentuk cabang (branching enzyme) akan memindahkan kurang lebih 6 residu glukosa pada salah satu residu glukosa yang ada pada glikogen primer untuk membentuk titik cabang. Enam residu glukosa tersebut akan diikatkan pada atom C nomor 6 pada molekul glikogen primer.
- Penambahan glukosa terus berlangsung pada kedua cabang hingga semakin panjang dan akan terbentuk banyak cabang-cabang baru di berbagai lokasi.
- Glikogenesis akan berakhir apabila gula dalam darah telah mencapai kadar yang normal.

Proses pembentukan glikogen melalui glikogenesis merupakan langkah penting dalam menjaga kadar gula dalam darah tetap normal. Ketidakmampuan tubuh untuk menjalankan glikogenesis dengan wajar dapat mengakibatkan timbulnya penyakit diabetes melitus. Diabetes melitus dapat menjadi penyakit yang berbahaya dan mematikan karena memicu berbagai komplikasi seperti stroke, kerusakan jaringan, dan kebutaan.

Mekanisme reaksi glikogenesis juga merupakan jalur metabolisme umum pada biosintesis disakarida dan polisakarida. Pada jaringan tumbuhan, disakarida sukrosa dihasilkan melalui reaksi kondensasi glukosa dan fruktosa yang diawali proses glikogenesis. Dalam proses tersebut UDP-glukosa bereaksi dengan fruktosa 6-fosfat dikatalisis oleh enzim sukrosa fosfat sintase, membentuk sukrosa 6-fosfat. Kemudian enzim sukrosa fosfatase akan mengkatalisis sukrosa 6-fosfat menjadi sukrosa.

### **1. Glikogenolisis**

Tahap pertama penguraian glikogen adalah pembentukan glukosa 1-fosfat. Berbeda dengan reaksi pembentukan glikogen, reaksi ini tidak melibatkan UDP-glukosa, dan enzimnya adalah glikogen fosforilase. Selanjutnya glukosa 1-fosfat diubah menjadi glukosa 6-fosfat oleh enzim yang sama seperti pada reaksi kebalikannya (glikogenesis) yaitu fosfoglukomutase.

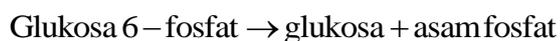


Gambar 2.24. Glikogenolisis

Proses glikogenolisis yang terjadi di dalam sel adalah sebagai berikut.

1. Enzim glikogen fosforilase akan menambahkan fosfat anorganik dan membebaskan glukosa dalam bentuk glukosa 1-fosfat. Pemecahan ini akan terus berlangsung hingga tersisa kurang lebih 4 residu glukosa dari titik cabang.
2. Enzim transferase akan memindahkan 3 residu glukosa menuju ujung cabang yang lain, proses ini akan menyisakan satu residu glukosa pada titik cabang yang terikat dengan ikatan  $\alpha$  1-6 glikosidik.
3. *Debranching enzyme* atau enzim pemecah cabang ( $\alpha$  1-6 glukosidase) akan membebaskan glukosa pada titik cabang dan melepaskannya dalam bentuk glukosa (bukan glukosa 1-fosfat seperti pada reaksi pertama).
4. Proses glikogenolisis berakhir pada tahapan diatas, namun hasil pemecahan glikogen yang berupa glukosa 1-fosfat akan mengalami proses lebih lanjut agar dapat berubah menjadi glukosa.

Tahap reaksi berikutnya adalah pembentukan glukosa dari glukosa 6-fosfat. Berbeda dengan reaksi kebalikannya dengan glukokinase, dalam reaksi ini enzim lain, glukosa 6-fosfatase, melepaskan gugus fosfat sehingga terbentuk glukosa. Reaksi ini tidak menghasilkan ATP dari ADP dan fosfat.



Glukosa yang terbentuk inilah nantinya akan digunakan oleh sel untuk respirasi sehingga menghasilkan energi, energi itu terekam / tersimpan dalam bentuk ATP

Istilah yang berhubungan dengan metabolisme penguraian glukosa dibagi menjadi dua:

1. Fermentasi ( Respirasi Anaerob)
2. Respirasi Aerob

**Fermentasi** atau peragian adalah proses penguraian senyawa kimia glukosa tanpa oksigen melalui proses glikolisis yang menghasilkan asam piruvat, namun tidak berlanjut dengan siklus Krebs dan transport Elektron karena suasana reaksi tanpa oksigen. Asam piruvat kemudian akan diproses tanpa oksigen menjadi asam piruvat ( Fermentasi Asam Piruvat ) atau asam piruvat menjadi asetal dehide kemudian alkohol dalam Fermentasi Alkohol

Dalam fermentasi alkohol menghasilkan gas  $\text{CO}_2$

**Respirasi aerob** adalah proses reaksi kimia yang terjadi apabila sel menyerap  $\text{O}_2$ , menghasilkan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ .

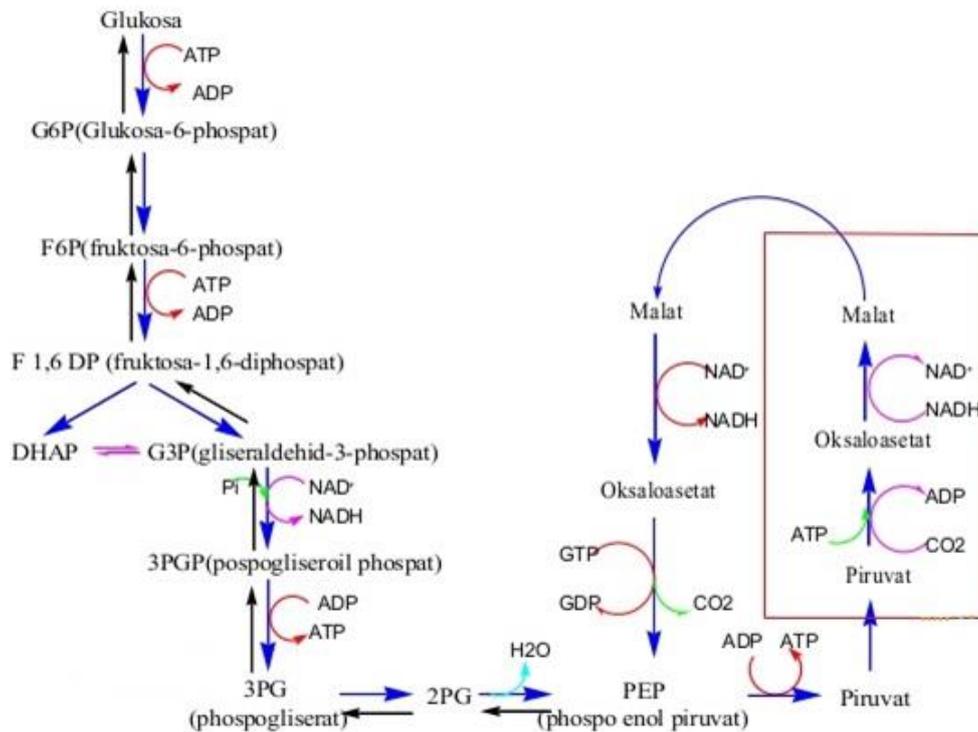
Respirasi dalam arti yang lebih khusus adalah proses penguraian glukosa dengan menggunakan  $\text{O}_2$ , menghasilkan  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan energi (dalam bentuk energi kimia, ATP)

## 2. Glukoneogenesis

Glukoneogenesis merupakan proses pembentukan glukosa dari senyawa bukan glukosa. Glukoneogenesis memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan akan glukosa, terutama ketika tubuh tidak mendapat pasokan glukosa yang cukup dari makanan. Glukosa merupakan molekul yang sangat penting terutama bagi eritrosit (sel darah merah) dan sel saraf otak, karena sel-sel tersebut tidak dapat menggunakan molekul lain sebagai sumber energi (walaupun dalam keadaan kelaparan yang sangat panjang sel saraf otak mampu menggunakan benda keton yaitu beta hidroksibutirat sebagai sumber energi).

Selain memenuhi kebutuhan energi bagi otak dan eritrosit, glukosa juga merupakan satu-satunya molekul penghasil energi bagi otot dalam keadaan anaerobic (tanpa oksigen). Glukosa juga diperlukan bagi pembentukan laktosa (gula susu) di kelenjar susu untuk memenuhi kebutuhan energi bayi. Pada mamalia, hati dan ginjal merupakan organ utama untuk berlangsungnya glukoneogenesis.

Secara umum tahapan reaksi glukoneogenesis hampir sama dengan tahapan reaksi glikolisis yang dibalik arahnya. Namun ada beberapa tahapan dalam glukoneogenesis yang tidak sama dengan glikolisis dan memerlukan kerja enzim-enzim yang berbeda. Perbedaan ini terjadi karena pada tahapan-tahapan tersebut enzim yang terlibat tidak dapat bekerja secara bolak-balik. Glikolisis merupakan reaksi yang menghasilkan energi, sedangkan glukoneogenesis merupakan proses yang membutuhkan energi dalam bentuk ATP.



Gambar 2.5. Proses ke kanan adalah reaksi glikolisis, sedangkan proses ke kiri adalah reaksi glukoneogenesis.

**Proses glukoneogenesis yang terjadi pada hati dan ginjal adalah sebagai berikut.**

- Pengubahan piruvat menjadi oksaloasetat, dikatalisis oleh enzim piruvat karboksilase.
- (Oksaloasetat pada reaksi di atas terdapat pada mitokondria dan harus dikeluarkan menuju sitoplasma, namun molekul tersebut tidak dapat melalui membran mitokondria sebelum diubah menjadi malat. Jadi oksaloasetat akan diubah menjadi malat agar dapat keluar menuju sitoplasma dan akan segera diubah kembali menjadi oksaloasetat).
- Pengubahan oksaloasetat menjadi malat, dikatalisis oleh enzim malat dehidrogenase. Malat keluar dari mitokondria menuju sitoplasma.
- Di sitoplasma, malat diubah menjadi oksaloasetat kembali yang dikatalisis oleh enzim malat dehidrogenase.
- Oksaloasetat kemudian akan diubah menjadi phospoenol piruvat, dikatalisis oleh enzim phospoenolpiruvat karboksilase.
- Phospoenol piruvat akan diubah menjadi 2-fosfogliserat, dikatalisis oleh enzim enolase.
- 2-fosfogliserat akan diubah menjadi 3-fosfogliserat yang dikatalisis enzim fosfogliseromutase.
- 3-fosfogliserat kemudian diubah menjadi 1,3 bifosfogliserat yang dikatalisis enzim fosfogliserokinase.

- 1,3 bifosfoglisarat akan diubah menjadi gliseraldehida 3 fosfat, reaksi ini dikatalisis oleh enzim gliseraldehida 3 fosfat dehidrogenase.
- Gliseraldehida 3 fosfat dapat diubah menjadi dihidroksi aseton fosfat (dengan reaksi yang dapat bolak-balik) yang dikatalisis oleh enzim isomerase.
- Gliseraldehida 3 fosfat dan dihidroksi aseton fosfat akan disatukan dan menjadi fruktosa 1,6 bifosfat yang dikatalisis enzim enolase.
- Fruktosa 1,6 bifosfat akan diubah menjadi fruktosa 6 fosfat oleh enzim fruktosa difosfatase.
- Fruktosa 6 fosfat akan diubah menjadi glukosa 6 fosfat oleh enzim fosfoglukoisomerase.
- Dan terakhir glukosa 6 fosfat akan diubah menjadi glukosa yang dikatalisis oleh enzim glukosa 6 fosfatase.

Asam amino glukogenik seperti alanin, arginin, asparagin, sistein, glutamate, histidin, metionin, prolin, serin, threonin, valin, dan triptofan dapat diubah menjadi glukosa setelah terlebih dahulu diubah menjadi piruvat atau senyawa antara yang lain. Asam laktat hasil oksidasi anaerob juga dapat diubah menjadi glukosa setelah diubah menjadi oksaloasetat di dalam mitokondria. Gliserol hasil metabolisme lemak juga dapat diubah menjadi glukosa setelah terlebih dahulu diubah menjadi gliserol 3 fosfat kemudian menjadi dihidroksi aseton fosfat dan langkah-langkah selanjutnya.

Hormon kortisol akan memicu terjadinya glukoneogenesis saat tubuh mendeteksi kurangnya glukosa di dalam darah. Hormon tersebut terutama mempengaruhi perubahan asam amino glukogenik menjadi glukosa. Sedangkan hormon tiroksin akan mempengaruhi masuknya lemak ke dalam hati untuk dapat diubah menjadi glukosa.

## LATIHAN

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

- 1) Jelaskan tentang senyawa karbohidrat memiliki daya reduksi !
- 2) Jelaskan tentang glikolisis !
- 3) Jelaskan tentang siklus krebs !

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Daya reduksi senyawa karbohidrat disebabkan oleh adanya gugus aldehyd bebas di dalam struktur molekulnya. Monosakarida yang mempunyai gugus aldehyd bersifat dapat mereduksi sedangkan yang tidak memiliki gugus aldehyd tidak memiliki daya reduksi
- 2) Proses perubahan glukosa menjadi asam piruvat dan berlangsung di sitosol. Jalur ini merupakan jalur katabolisme karbohidrat yang universal, tidak hanya berlangsung di dalam tubuh manusia dan hewan tingkat tinggi, tetapi juga pada tumbuhan dan hampir semua mikroorganisme.

- 3) Siklus krebs atau siklus asam sitrat atau asam trikarboksilat berlangsung di mitokondria, senyawa yang menjadi substrat adalah Asetil KoA yang berasal dari hasil dekarboksilasi oksidatif asam piruvat.

## RINGKASAN

Glikolisis dalam siklus Krebs adalah jalur katabolisme atau degradasi karbohidrat. Pada kedua proses tersebut, glukosa diubah menjadi senyawa-senyawa yang lebih kecil molekulnya sehingga akhirnya menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ .

Sebaliknya glikoneogenesis merupakan salah satu jalur anabolisme karbohidrat. Melalui jalur ini berlangsung pembentukan glukosa dari senyawa-senyawa non-karbohidrat. Jalur ini merupakan salah satu mekanisme tubuh untuk mempertahankan kadar gula darah ketika masukan karbohidrat dari luar kurang mencukupi.

Glikolisis merupakan suatu proses yang menyebabkan terjadinya konversi satu molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat. Hal ini merupakan metabolisme primitif karena bekerja pada sel yang paling sederhana dan tidak memerlukan oksigen. Jalur ini memiliki lima fungsi utama dalam sel, yakni : pertama , glukosa diubah menjadi piruvat yang bisa dioksidasi dalam siklus asam sitrat. Kedua, banyak senyawa selain glukosa yang dapat memasuki jalur pada tahap intermediate. Ketiga, dalam beberapa sel, jalur ini dimodifikasi untuk memungkinkan sintesis glukosa. Keempat, jalur ini mengandung intermediate yang terlibat dalam reaksi metabolisme alternatif. Kelima, untuk setiap molekul glukosa yang dikonsumsi, dua molekul ADP difosforilasi untuk menghasilkan 2 ATP

## TES 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Karbohidrat diserap dari saluran pencernaan sebagian besar dalam bentuk :
- A. Monosakarida
  - B. Polisakarida
  - C. Asam amino ketogenik
  - D. Asam amino glikogenik
- 2) Fruktosa dapat memasuki jalur glikolisis setelah diaktifkan oleh enzim:
- A. Glukokinase
  - B. Heksokinase
  - C. Fruktokinase
  - D. Fosfofruktokinase

- 3) Pada awal jalur glikolisis, glukosa diaktivasi menjadi :
- A. Glukosa-1-fosfat
  - B. Glukosa-6-fosfat
  - C. Glikogen-6-fosfat
  - D. Asetik Ko-A
- 4) Oksidasi sempurna glukosa dapat berlangsung di hampir semua sel tubuh manusia, kecuali sel-sel :
- A. Jantung
  - B. Ginjal
  - C. Hati
  - D. Otak
- 5) Oksidasi sempurna satu molekul glukosa di dalam sel akan menghasilkan energi setara dengan :
- A. 2 ATP
  - B. 13 ATP
  - C. 38 ATP
  - D. 8 ATP
- 6) Substrat utama untuk glukoneogenesis adalah ;
- A. Asam laktat
  - B. Asam piruvat
  - C. Asam amino glikogenik
  - D. Asam amino ketogenik
- 7) Proses pembentukan glikogen dari glukosa di dalam sel hati disebut :
- A. Glikolisis anaerob
  - B. Glikogenesis
  - C. Glikoneogenesis
  - D. Glikolisis aerob
- 8) Enzim dalam ragi yang dapat mengubah piruvat menjadi etanol, yaitu :
- A. Piruvat dehidrogenase
  - B. Piruvat dekarboksilase
  - C. Laktat dehidrogenase
  - D. Alkohol dehidrogenase

- 9) Oksidasi satu molekul asetik Ko-A dalam siklus Krebs akan menghasilkan energi setara:
- A. 2 ATP
  - B. 12 ATP
  - C. 38 ATP
  - D. 8 ATP
- 10) Enzim yang berperan mengaktivasi glukosa menjadi turunan fosfat tersebut adalah :
- A. Heksokinase atau glukokinase
  - B. Gliseraldehida-3-fosfat dehidrogenase
  - C. Piruvat karboksilase
  - D. Piruvat dehidrogenase

## Kunci Jawaban Tes

### Tes 1

- 1) Jawaban (A) definisi karbohidrat adalah senyawa polihidroksi aldehida dan polihidroksi keton.
- 2) Jawaban (B) ikatan glikosidik yang menghubungkan monomer dalam polisakarida
- 3) Jawaban (D) gula yang terdapat dalam susu
- 4) Jawaban (A) gula darah adalah glukosa
- 5) Jawaban (A) ikatan glikosidik alfa-1,4 yang menghubungkan residu glukosa penyusun selulosa
- 6) Jawaban (B) laktosa tersusun dari glukosa dan galaktosa
- 7) Jawaban (B) amilum senyawa karbohidrat cadangan pada tumbuhan
- 8) Jawaban (C) glukosa monomer penyusun pati
- 9) Jawaban (A) glukosa
- 10) Jawaban (C) Ribosa senyawa pentosa yang merupakan komponen mRNA

### Tes 2

- 1) Jawaban (A) Karbohidrat diserap dari saluran pencernaan dalam bentuk monosakarida, terutama sebagai glukosa, fruktosa dan galaktosa.
- 2) Jawaban (D) enzim fosfofruktokinase
- 3) Jawaban (B) glukosa-6-fosfat pada awal glikolisis
- 4) Jawaban (D) otak
- 5) Jawaban (B) 8 ATP pada proses oksidasi
- 6) Jawaban (B) asam piruvat sebagai substrat utama glukoneogenesis
- 7) Jawaban (B) Proses pembentukan glikogen adalah glikogenesis
- 8) Jawaban (D) asam piruvat akan difermentasi menjadi etanol oleh enzim alkohol dehidrogenase.
- 9) Jawaban (C) Hasil oksidasi asetil Ko-A dalam siklus krebs
- 10) Jawaban (A) enzim yang berperan mengaktivasi glukosa menjadi turunan fosfat adalah heksokinase atau glukokinase

## Daftar Pustaka

- Alberts B, Johnson A, Lewis J, Raff m, Roberts K, Walter P. 2007. *Molecular Biology of the Cell 5th ed.* New York: Taylor & Francis, Inc.,
- Berg JM, Tymoczko JL, Stryer L. 2007. *Biochemistry 6 th ed.* New York: WH Freeman and Company.
- Moran LA, Horton HR, Scrimgeour KG. 2012. *Principles of Biochemistry 5th ed.* New York: Pearson. ,
- Nelson DL, Cox MM. 2004. *Lehninger Principles of Biochemistry 4 th ed.* London: WH Freeman. ,
- Yohanes, Ngili. 2013. *Biokimia Dasar, edisi ke-1.* Bandung :Rekayasa Sains.
- David, Page. 1985. *Prinsip-prinsip Biokimia edisi ke-2.* Penerbit Erlangga,
- Ernawati, Sinaga. 2012. *Biokimia Dasar, edisi ke-1.* Penerbit PT ISFI.

## **BAB III PROTEIN**

*Dra. Mimin Kusmiyati, M.Si.*

### **PENDAHULUAN**

Protein adalah senyawa organik kompleks berbobot molekul besar yang terdiri dari asam amino yang dihubungkan satu sama lain dengan ikatan peptida. Molekul protein mengandung karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan kadang kala sulfur serta fosfor.

Protein berperan penting dalam pembentukan struktur, fungsi, regulasi sel-sel makhluk hidup dan virus. Protein juga bekerja sebagai neurotransmitter dan pembawa oksigen dalam darah (hemoglobin). Protein juga berguna sebagai sumber energi tubuh.

Protein merupakan salah satu biomolekul raksasa, selain polisakarida, lipid, dan polinukleotida, yang merupakan penyusun utama semua makhluk hidup. Pada manusia, protein menyumbang dari 20% berat total tubuh. Protein ibaratnya seperti sebuah mesin, mesin yang menjaga dan menjalankan fungsi tubuh semua makhluk hidup. Tubuh manusia terdiri dari sekitar 100 trilyun sel, masing-masing sel memiliki fungsi yang spesifik. Setiap sel memiliki ribuan protein berbeda, yang bersama-sama membuat sel melakukan tugasnya. Protein tersusun dari monomer-monomer asam amino. Di dalamnya memiliki gugus karboksil dan gugus amino.

bab 3 ini akan berisi paparan tentang protein dan peran serta fungsinya dalam proses metabolisme. Setelah mempelajari bab 3 ini, Anda diharapkan dapat menjelaskan protein sebagai biomakromolekul dan perannya dalam proses metabolisme. Selanjutnya, setelah Anda mempelajari materi dalam bab 3 ini dengan saksama, di akhir proses pembelajaran Anda diharapkan akan dapat:

1. Menyebutkan klasifikasi dan sumber protein
2. Menjelaskan tentang struktur dan tata nama
3. Menjelaskan tentang asam amino dan ikatan peptida
4. Menjelaskan tentang metabolisme asam amino
5. Menjelaskan tentang biosintesis asam amino

Sebelum mempelajari materi tentang protein terlebih dahulu perlu dipahami materi kimia organik. Agar belajar mandiri Anda berjalan lancar maka materi bab 3 ini dikemas dalam 2 (dua) topik, yaitu:

- Topik 1. Protein
- Topik 2. Metabolisme Protein

# Topik 1

## Protein

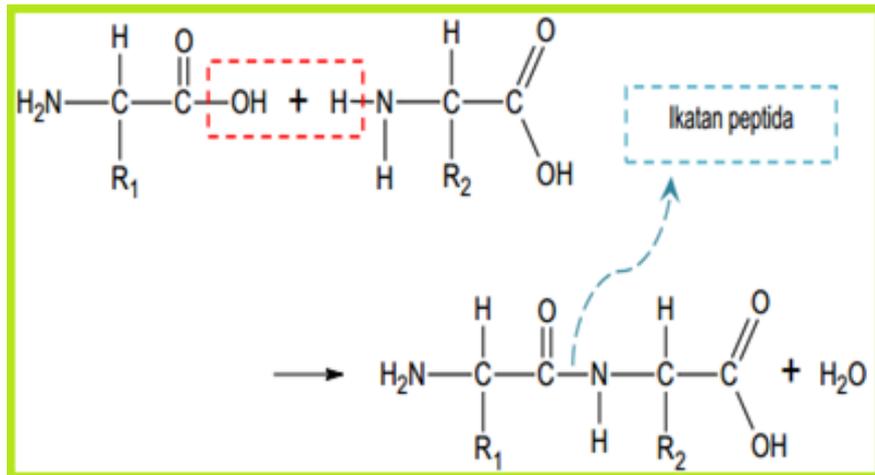
Protein adalah biomakromolekul selain karbohidrat dan lipid yang memiliki peranan penting dalam kehidupan. Peran dan fungsi protein sebagai pertahanan tubuh, protein transport, protein struktural, enzim, hormon, reseptor, pertahanan tubuh dan cadangan energi.

### A. DEFINISI DAN CIRI PROTEIN

Protein merupakan makromolekul yang menyusun lebih dari separuh bagian dari sel. Protein menentukan ukuran dan struktur sel, komponen utama dari sistem komunikasi antar sel serta sebagai katalis berbagai reaksi biokimia di dalam sel. Karena itulah sebagian besar aktivitas penelitian biokimia tertuju pada protein, khususnya hormon, antibodi dan enzim. Semua jenis protein terdiri dari rangkaian dan kombinasi dari 20 asam amino. Setiap jenis protein mempunyai jumlah dan urutan asam amino yang khas. Di dalam sel, protein terdapat baik pada membran plasma maupun membran internal yang menyusun organel sel seperti mitokondria, retikulum endoplasma, nukleus dan badan golgi dengan fungsi yang berbeda-beda tergantung pada tempatnya. Protein-protein yang terlibat dalam reaksi biokimia sebagian besar berupa enzim banyak terdapat di dalam sitoplasma dan sebagian terdapat pada kompartemen dari organel sel. Protein merupakan kelompok biomakromolekul yang sangat heterogen. Ketika berada di luar makhluk hidup atau sel, protein sangat tidak stabil. Protein merupakan komponen utama bagi semua benda hidup termasuk mikroorganisme, hewan dan tumbuhan. Protein merupakan rangkaian gabungan 22 jenis asam amino. Protein ini memainkan berbagai peranan dalam benda hidup dan bertanggungjawab untuk fungsi dan ciri-ciri benda hidup.

Keistimewaan lain dari protein ini adalah strukturnya yang mengandung N (15,30-18%), C (52,40%), H (6,90-7,30%), O (21- 23,50%), S (0,8-2%), disamping C, H, O (seperti juga karbohidrat dan lemak), dan S kadang-kadang P, Fe dan Cu (sebagai senyawa kompleks dengan protein). Dengan demikian maka salah satu cara terpenting yang cukup spesifik untuk menentukan jumlah protein secara kuantitatif adalah dengan penentuan kandungan N yang ada dalam bahan makanan atau bahan lain.

Protein merupakan polimer dari asam amino, disebut juga polipeptida. Antar asam amino terdapat **ikatan peptida**, yaitu ikatan antara gugus karboksil suatu asam amino dengan gugus amino dari asam amino lain. Ikatan peptida terbentuk melalui reaksi berikut.



Gambar 3.1 Ikatan Peptida

## 1. Jenis Protein

- Kolagen, protein struktur yang diperlukan untuk membentuk kulit, tulang dan ikatan tisu.
- Antibodi, protein sistem pertahanan yang melindungi badan daripada serangan penyakit.
- Dismutase superoxide, protein yang membersihkan darah kita.
- Ovulbumin, protein simpanan yang memelihara badan.
- Hemoglobin, protein yang berfungsi sebagai pembawa oksigen
- Toksin, protein racun yang digunakan untuk membunuh kuman.
- Insulin, protein hormon yang mengawal aras glukosa dalam darah.
- Tripsin, protein yang mencernakan makanan protein.

## 2. Sumber Protein

Protein lengkap yang mengandungi semua jenis asam amino esensial, ditemukan dalam daging, ikan, unggas, keju, telur, susu, produk sejenis Quark, tumbuhan berbiji, suku polong-polongan, dan kentang. Protein tidak lengkap ditemukan dalam sayuran, padi-padian, dan polong-polongan.

Studi dari Biokimiawan USA Thomas Osborne Lafayette Mendel, Profesor untuk biokimia di Yale, 1914, mengujicobakan protein konsumsi dari daging dan tumbuhan kepada kelinci. Satu grup kelinci diberikan makanan protein hewani, sedangkan grup yang lain diberikan protein nabati. Dari eksperimennya didapati bahwa kelinci yang memperoleh protein hewani lebih cepat bertambah beratnya dari kelinci yang memperoleh protein nabati. Kemudian studi selanjutnya, oleh McCay dari Universitas Berkeley menunjukkan bahwa kelinci yang memperoleh protein nabati, lebih sehat dan hidup dua kali lebih lama.

Kualitas protein didasarkan pada kemampuannya untuk menyediakan nitrogen dan asam amino bagi pertumbuhan, pertahanan dan memperbaiki jaringan tubuh. Secara umum kualitas protein tergantung pada dua karakteristik berikut:

- a. Digestibilitas protein: untuk dapat digunakan oleh tubuh, asam amino harus dilepaskan dari komponen lain makanan dan dibuat agar dapat diabsorpsi. Jika komponen yang tidak dapat dicerna mencegah proses ini asam amino yang penting hilang bersama feses.
- b. Komposisi asam amino: seluruh asam amino yang digunakan dalam sintesis protein tubuh harus tersedia pada saat yang sama agar jaringan yang baru dapat terbentuk. Dengan demikian makanan harus menyediakan setiap asam amino dalam jumlah yang mencukupi untuk membentuk asam amino lain yang dibutuhkan.

Faktor yang mempengaruhi kebutuhan protein:

a. *Perkembang jaringan*

Periode dimana perkembangan terjadi dengan cepat seperti pada masa janin dan kehamilan membutuhkan lebih banyak protein.

b. *Kualitas protein*

Kebutuhan protein dipengaruhi oleh kualitas protein makanan dan pola asam aminonya. Tidak ada rekomendasi khusus untuk orang-orang yang mengonsumsi protein hewani bersama protein nabati. Bagi mereka yang tidak mengonsumsi protein hewani dianjurkan untuk memperbanyak konsumsi pangan nabatinya untuk kebutuhan asam amino.

c. *Digestibilitas protein*

Ketersediaan asam amino dipengaruhi oleh persiapan makanan. Panas menyebabkan ikatan kimia antara gula dan asam amino yang membentuk ikatan yang tidak dapat dicerna. Digestibilitas dan absorpsi dipengaruhi oleh jarak antara waktu makan, dengan interval yang lebih panjang akan menurunkan persaingan dari enzim yang tersedia dan tempat absorpsi.

d. *Kandungan energi dari makanan*

Jumlah yang mencukupi dari karbohidrat harus tersedia untuk mencukupi kebutuhan energi sehingga protein dapat digunakan hanya untuk pembagunan jaringan. Karbohidrat juga mendukung sintesis protein dengan merangsang pelepasan insulin.

e. *Status kesehatan*

Dapat meningkatkan kebutuhan energi karena meningkatnya katabolisme. Setelah trauma atau operasi, asam amino dibutuhkan untuk pembentukan jaringan, penyembuhan luka dan produksi faktor imunitas untuk melawan infeksi

### **3. Peranan dan Fungsi Protein**

Protein merupakan polipeptida alami yang memiliki berat molekul lebih dari 5000. Makromolekul ini sangat berbeda-beda sifat fisiknya, mulai dari enzim yang larut dalam air sampai dengan keratin yang tidak larut, seperti rambut dan tanduk. Protein memiliki berbagai fungsi biologis seperti sebagai protein struktural, enzim, hormon, protein transport

di dalam darah, protein transport membran, komunikasi sel, reseptor, protein untuk motilitas sel, pertahanan tubuh, dan protein sebagai cadangan energi.

*a. Protein sebagai senyawa struktural*

Kolagen adalah protein yang paling banyak terdapat dalam tubuh mamalia (25%), komponen utama jaringan kulit dan jaringan penghubung. Selain kolagen, protein struktural lain adalah keratin (rambut, bulu, kuku) yang merupakan komponen penting pada sitoskeleton yaitu pada filamen intermediet.

*b. Protein sebagai enzim*

Enzim adalah biokatalisator atau katalisator berbagai reaksi biokimia. Semuanya merupakan molekul protein dan lebih dari 200 jenis, bekerja menjalankan reaksi biokimia di dalam maupun diluar sel. Enzim yang bekerja di dalam sel disebut enzim intraseluler dan yang bekerja diluar sel disebut ekstraseluler. Amilase, protease, lipase saluran pencernaan adalah contoh enzim intraseluler sedangkan enzim kinase, oksidoreduktase dan transferase yang bekerja pada berbagai jalur metabolisme merupakan contoh enzim intraseluler.

*c. Protein sebagai hormon*

Tidak semua hormon merupakan senyawa protein atau peptida, ada yang merupakan senyawa steroid, amina atau peptida. Hormon yang disekresi oleh hipotalamus, hipofisis dan pankreas semuanya merupakan hormon peptida. Insulin adalah salah satu contoh hormon peptida, dengan massa molekul sekitar 6000 Dalton. Molekul insulin tersusun oleh dua rantai polipeptida, karena itu disebut protein dimerik. Rantai A insulin pada berbagai spesies umumnya terdiri dari 21 asam amino, sedangkan rantai B tersusun oleh 30 asam amino. Antara rantai A dan rantai B terdapat 2 jembatan disulfida yaitu antara A7 dengan B7, dan A20 dengan B19. Insulin merupakan hormon yang berperan dalam mengatur kadar gula darah dan memfasilitasi transport glukosa ke dalam sel. Defisiensi insulin akan menyebabkan hiperglikemia sebab transport gula ke dalam sel terhambat.

*d. Protein Transporter*

Molekul-molekul yang masuk ke dalam peredaran darah sebagian besar diangkut oleh protein transport yang ada di dalam darah. Hemoglobin adalah salah satu contoh protein yang berperan sebagai molekul transport di dalam darah, pembawa oksigen ke seluruh sel yang memerlukan. Hemoglobin tersusun oleh empat rantai polipeptida ( 141 asam amino dan 2 rantai lainnya, masing-masing tersusun dari 146 residu asam amino). Setiap rantai memiliki satu gugus hemoglobin tersendiri. Selain hemoglobin, di dalam darah juga terdapat berbagai protein transport lainnya, misalnya transferin yang bertugas mengangkut ion besi, transtiretin yang bertugas mengangkut hormon tiroid dan albumin yang mengangkut berbagai molekul termasuk xenobiotik.

Protein juga berperan sebagai molekul transporter di membran sel (struktur semipermeabel). Sebagian besar senyawa tidak dapat melintasi membran, masuk ke dalam sel atau keluar dari dalam sel tanpa bantuan protein transporter yang berada di permukaan

membran. Salah satu contoh adalah glikose transporter/Glut yaitu protein transporter yang berada di membran plasma bertugas mentransportkan glukosa ke dalam sel. Contoh lainnya adalah Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-ATP ase, Ca<sup>+</sup>-ATP ase, glutamat transporter, dan lain lain.

*e. Protein gerak*

Kontraksi otot dan motilitas sel melibatkan interaksi antara protein gerak sel yaitu aktin (filamen aktin, hasil polimerisasi dari sub unit yang disebut G-aktin ) dan miosin (protein gerak terbesar dan panjangnya 150 nm).

*f. Protein sebagai pertahanan tubuh*

Antibodi adalah salah satu alat pertahanan tubuh, merupakan molekul immunoglobulin, merupakan protein yang tersusun oleh beberapa rantai polipeptida dan yang saat ini dikenal adalah IgG, IgM, IgA, IgD dan IgF.

#### **4. Penggolongan Protein**

Protein adalah molekul yang sangat vital untuk organisme dan terdapat di semua sel. Protein merupakan polimer yang disusun oleh 20 macam asam amino standar. Rantai asam amino dihubungkan dengan ikatan kovalen yang spesifik. Struktur dan fungsi ditentukan oleh kombinasi, jumlah dan urutan asam amino, sedangkan sifat fisik dan kimiawi dipengaruhi oleh asam amino penyusunnya.

#### **5. Berdasarkan struktur molekulnya**

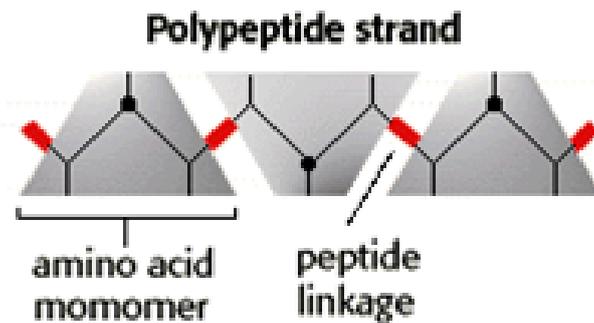
Struktur protein terdiri dari empat macam :

*a. Struktur primer (struktur utama)*

Struktur primer pada protein berupa 1 rantai polipeptida yang merupakan rangkaian asam amino dengan urutan tertentu. Susunan ini menentukan sifat dasar dari berbagai protein dan secara umum menentukan bentuk struktur sekunder dan tersier. Struktur ini terdiri dari asam-asam amino yang dihubungkan satu sama lain secara kovalen melalui ikatan peptida.

Struktur primer peptida adalah urutan atau sekuens residu-residu asam amino penyusun rantai peptida. Sekuens atau urutan asam amino dalam suatu molekul protein sangat menentukan sifat protein tersebut. Walaupun, komposisi asam amino suatu protein X sama dengan protein Y misalnya, namun jika urutannya tidak sama, maka kedua protein itu merupakan dua protein yang berbeda satu sama lain, baik sifat kimia maupun aktivitas biologisnya. Sekuens asam amino dalam suatu protein ditentukan oleh gen yang mengkode protein tersebut. Gen akan ditranskripsikan NS(mRNA) dan selanjutnya akan ditranslasikan oleh ribosom menjadi protein dalam suatu proses yang disebut sintesis protein. Struktur primer suatu protein kadang-kadang disebut sebagai struktur kovalen sebab ikatan kimia yang membentuk struktur primer tersebut merupakan ikatan kovalen yang disebut ikatan peptida.

Struktur primer akan menentukan bagaimana konformasi (struktur sekunder, tersier atau kuarterner) suatu protein terbentuk. Aktivitas biologis suatu protein ditentukan oleh konformasinya. Apabila konformasinya rusak atau berubah maka kemungkinan besar aktivitas biologisnya pun akan berubah, walaupun struktur primernya msih tetap tidak terganggu. Itu sebabnya sebuah enzim dapat hilang aktivitasnya bila terdenaturasi,walaupun keadaan struktur primernya tidak terganggu.



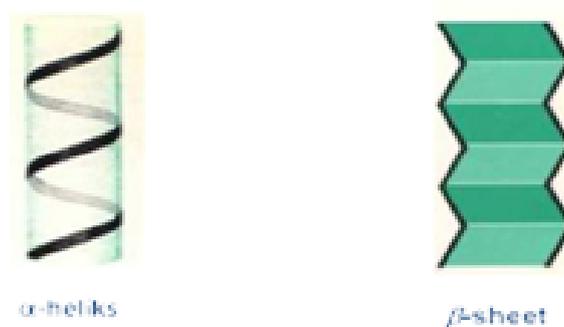
Gambar 3.2. Contoh Struktur Primer Protein

b. Struktur sekunder

Protein sudah mengalami interaksi intermolekul, melalui rantai samping asam amino. Ikatan yang membentuk struktur ini, didominasi oleh ikatan hidrogen antar rantai samping yang membentuk pola tertentu bergantung pada orientasi ikatan hidrogennya. Ada dua jenis struktur sekunder, yaitu: *alpha-heliks* dan *beta-sheet*.

Struktur sekunder terutama terbentuk oleh ikatan hidrogen yang terjadi antar gugus yang terdapat pada tulang punggung rantai polipeptida. Elemen dasar konformasi suatu molekul polipeptida adalah struktur sekunder.

Ada beberapa bentuk struktur sekunder yang umum didapati pada polipeptida yaitu struktur *alfa heliks*, *beta-pleated sheet* dan struktur tekukan/*turn*. Kolagen memiliki struktur sekunder yang khas disebut heliks kolagen. Di samping itu, ada pula struktur sekunder yang tidak dapat digolongkan ke dalam salah satu dari tiga struktur tersebut, oleh sebab itu, disebut *random coil*.



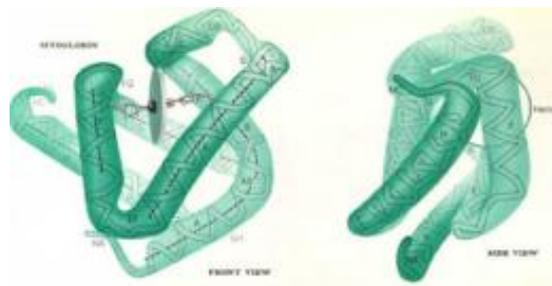
Gambar 3.3. Contoh Struktur Sekunder Protein

c. *Struktur Tersier*

Struktur tersier terbentuk karena adanya pelipatan membentuk struktur yang kompleks. Pelipatan distabilkan oleh ikatan hidrogen, ikatan disulfida, interaksi ionik, ikatan hidrofobik, ikatan hidrofilik.

Struktur tersier menggambarkan bagaimana elemen-elemen struktur sekunder yang terdapat pada rantai polipeptida berinteraksi satu sama lain membentuk lipatan atau lekukan yang khas untuk masing-masing peptida.

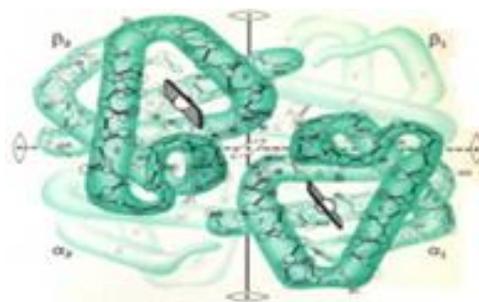
Struktur tersier adalah konformasi global suatu rantai polipeptida tunggal. Ikatan yang bertanggung jawab pada pembentukan struktur tersier terutama adalah ikatan hidrogen dan ikatan hidrofobik. Ikatan hidrogen pada pembentukan struktur tersier ini tidak melibatkan gugus pada tulang punggung rantai polipeptida tetapi juga gugus yang terdapat pada rantai samping residu asam amino.



Gambar 3.4. Contoh Struktur Tersier Protein

d. *Struktur Kuartener*

Struktur kuartener terbentuk dari beberapa bentuk tersier atau multi sub unit. Interaksi intermolekul antar subunit protein ini membentuk struktur keempat/kuartener. Protein yang tersusun oleh satu rantai polipeptida dan juga ada yang tersusun oleh lebih dari satu rantai polipeptida (protein oligomerik). Struktur kuartener menggambarkan hubungan antar tiap rantai polipeptida yang membentuk suatu molekul peptida oligomerik. Hal ini merupakan asosiasi stabil dari beberapa rantai polipeptida yang terdapat dalam satu molekul protein oligomerik, membentuk suatu unit yang aktif. Struktur kuartener umumnya distabilkan oleh ikatan nonkovalen, misalnya ikatan hidrogen, ikatan ionik, interaksi Van Der Waals, namun kadang-kadang interaksi antar rantai polipeptida dapat juga terjadi melalui ikatan disulfida.



Gambar 3.5. contoh struktur kuartener protein

## 6. Berdasarkan Bentuk dan Sifat Fisik

### a. *Protein globular*

Terdiri dari polipeptida yang bergabung satu sama lain (berlipat rapat) membentuk bulat padat. Misalnya enzim, albumin, globulin, protamin. Protein ini larut dalam air, asam, basa, dan etanol.

### b. *Protein serabut (fibrous protein)*

Terdiri dari peptida berantai panjang dan berupa serat-serat yang tersusun memanjang, dan memberikan peran struktural atau pelindung. Misalnya fibroin pada sutera dan keratin pada rambut dan bulu domba. Protein ini tidak larut dalam air, asam, basa, maupun etanol.

## 7. Berdasarkan Fungsi Biologi

Pembagian protein didasarkan pada fungsinya di dalam tubuh, antara lain:

- a. Enzim (ribonuklease, tripsin)
- b. Protein transport (hemoglobin, mioglobin, serum, albumin)
- c. Protein nutrisi dan penyimpan (gliadin/gandum, ovalbumin/telur, kasein/susu, feritin/jaringan hewan)
- d. Protein kontraktile (aktin dan tubulin)
- e. Protein struktural (kolagen, keratin, fibrin)
- f. Protein pertahanan (antibodi, fibrinogen, dan trombin, bisa ular)
- g. Protein pengatur (hormon insulin dan hormon paratiroid)

## 8. Berdasarkan Daya Larutnya

### a. Albumin

Larut air, mengendap dengan garam konsentrasi tinggi. Misalnya albumin telur dan albumin serum.

### b. Globulin Glutelin

Tidak larut dalam larutan netral, larut asam, dan basa encer. Glutenin (gandum), orizenin (padi).

### c. Gliadin (prolamin)

Larut dalam etanol 70-80%, tidak larut dalam air dan etanol 100%. Gliadin/gandum, zein/jagung.

### d. Histon

Bersifat basa, cenderung berikatan dengan asam nukleat di dalam sel. Globin bereaksi dengan heme (senyawa asam menjadi hemoglobin). Tidak larut dalam air, garam encer dan pekat (jenuh 30-50%). Misalnya globulin serum dan globulin telur.

### e. Protamin

Larut dalam air dan bersifat basa, dapat berikatan dengan asam nukleat menjadi nukleoprotamin (sperma ikan). Contohnya salmin.

## 9. Protein Majemuk

Protein majemuk adalah protein yang mengandung senyawa bukan hanya protein, seperti:

- a. Fosfoprotein : protein yang mengandung fosfor, misalnya kasein pada susu, vitelin pada kuning telur
- b. Kromoprotein: protein berpigmen, misalnya asam askorbat oksidase mengandung Cu
- c. Protein Koenzim: misalnya NAD<sup>+</sup>, FMN, FAD dan NADP<sup>+</sup>
- d. Lipoprotein: mengandung asam lemak, lesitin
- e. Metaloprotein: mengandung unsur-unsur anorganik (Fe, Co, Mn, Zn, Cu, Mg dsb)
- f. Glikoprotein: gugus prostetik karbohidrat, misalnya musin (pada air liur), oskomukoid (pada tulang)
- g. Nukleoprotein: protein dan asam nukleat berhubungan (berikatan valensi sekunder) misalnya pada jasad renik.

## 10. Sintesis Protein

Sintesis protein, yaitu proses penyusunan senyawa protein dengan membentuk rangkaian rantai polipeptida. Sintesis protein ini terjadi di dalam ribosom dan pengaturan sintesis protein dilakukan oleh gen (DNA) di dalam inti. Secara garis besar, tahapan proses sintesis protein antara lain seperti berikut :

### a. *Transkripsi*

DNA membuka menjadi 2 rantai terpisah. mRNA berantai tunggal, maka salah satu rantai DNA ditranskripsi (dicopy). Rantai yang ditranskripsi dinamakan DNA sense atau template dan kode genetik yang dikode disebut kodogen. Bagian yang tidak ditranskripsi disebut DNA antisense/komplementer. RNA Polimerase membuka pilinan rantai DNA dan memasukkan nukleotida-nukleotida untuk berpasangan dengan DNA sense sehingga terbentuklah rantai mRNA.

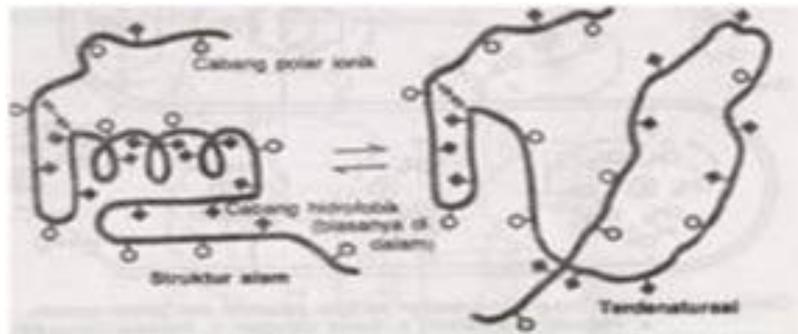
### b. *Translasi*

mRNA/RNAd yang sudah terbentuk keluar dari anak inti sel menuju rRNA. Disana mRNA masuk ke rRNA/RNAr diikuti oleh tRNA / RNAt. Ketika antikodon pada tRNA cocok dengan kodon mRNA kemudian rantai bergeser ke tengah. Kodon mRNA berikutnya dicocokkan dengan tRNA kemudian asam amino yang pertama berikatan dengan asam amino kedua. tRNA pertama keluar dari rRNA. Proses ini berlangsung hingga kodon stop, ribosom subunit besar dan kecil terpisah, mRNA dan tRNA keluar dari ribosom. Kodon stop : UAA,UAG, UGA.

## 11. Denaturasi Protein

Denaturasi protein adalah proses perubahan struktur lengkap dan karakteristik bentuk protein akibat dari gangguan interaksi sekunder, tersier, dan kuaterner struktural seperti suhu, penambahan garam, enzim dll. Fungsi biokimia protein tergantung pada tiga dimensi bentuknya atau susunan senyawa yang terdapat pada asam amino. Hasil denaturasi adalah

hilangnya aktivitas biokimia yang terjadi didalam senyawa protein itu sendiri. Denaturasi protein tidak mempengaruhi kandungan struktur utama protein yaitu C, H, O, dan N, meskipun beberapa protein mengalami kemungkinan untuk kehilangan kandungan senyawa karakteristik struktural saat denaturasi. Namun, kebanyakan protein tidak akan mengalami hal tersebut, hanya saja tidak menutup kemungkinan protein akan berubah struktur kecil didalamnya saat proses denaturasi terjadi. Bagaimanapun, untuk perubahan denaturasi secara umum, prosesnya sama dan tidak dapat diubah.



Gambar 3.5. Denaturasi Protein

Denaturasi dapat diartikan suatu perubahan atau modifikasi terhadap struktur sekunder, tersier, dan kuartener terhadap molekul protein, tanpa terjadinya pemecahan ikatan-ikatan kovalen. Denaturasi dapat pula diartikan suatu proses terpecahnya ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, ikatan garam, dan terbukanya lipatan molekul.

Pemekaran atau pengembangan lipatan molekul protein yang terdenaturasi akan membuka gugus reaktif yang ada pada rantai polipeptida, selanjutnya akan terjadi pengikatan kembali pada gugus reaktif yang sama atau berdekatan. Bila unit ikatan yang terbentuk cukup banyak sehingga protein tidak lagi terdispersi sebagai suatu koloid, maka protein tersebut mengalami koagulasi. Apabila ikatan-ikatan pada gugus-gugus reaktif protein tersebut menahan seluruh cairan, akan terbentuklah gel. Sedangkan bila cairan terpisah dari protein yang terkoagulasi itu, protein akan mengendap.

Protein yang terdenaturasi berkurang kelarutannya. Lapisan molekul protein bagian dalam yang bersifat hidrofobik berbalik ke luar, sedangkan bagian luar yang bersifat hidrofil terlipat ke dalam. Pelipatan atau pembalikan terjadi khususnya bila larutan protein telah mendekati pH isoelektrik, dan akhirnya protein akan menggumpal dan mengendap. Viskositas akan bertambah karena molekul mengembang dan menjadi asimetrik, demikian jua sudut putaran optik larutan protein akan meningkat. Enzim-enzim yang gugus prostetikanya terdiri dari protein akan kehilangan aktivitasnya sehingga tidak berfungsi lagi sebagai enzim yang aktif.

Denaturasi protein dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu oleh panas, pH ekstrim, bahan kimia, mekanik, beberapa pelarut organik seperti alkohol atau aseton, urea, deterjen, dan lain-lain. Masing-masing cara mempunyai pengaruh yang berbeda-beda terhadap denaturasi protein. Senyawa kimia seperti urea dan garam guanidina dapat memecah ikatan

hidrogen yang pada akhirnya menyebabkan denaturasi protein. Dengan cara tersebut, urea dan garam guanidina dapat memecah interaksi hidrofobik dan meningkatkan daya kelarutan gugus hidrofobik dalam air. Deterjen atau sabun dapat menyebabkan denaturasi protein karena senyawa ini dapat membentuk jembatan antara gugus hidrofobik dengan hidrofilik sehingga praktis terdenaturasi.

## 12. Kelebihan dan Kekurangan Protein

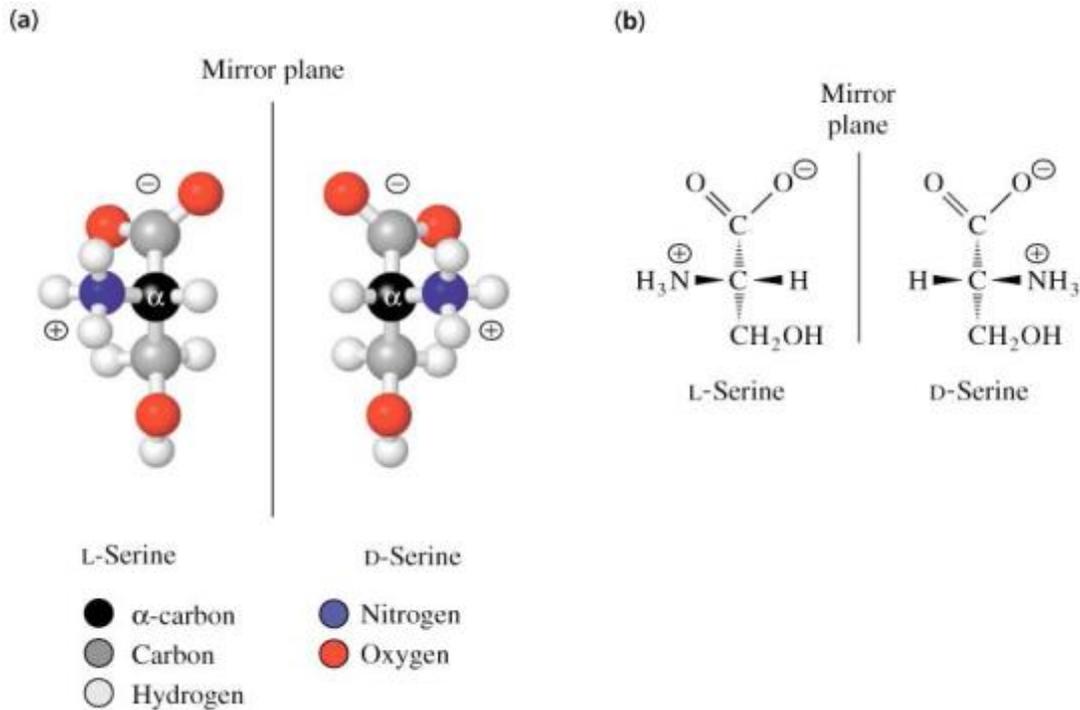
Kelebihan protein dapat mengganggu metabolisme protein yang berada di hati. Memperberat kerja hati dan ginjal untuk membuang nitrogen pada metabolisme asam amino (deaminasi). Kerja ginjal terganggu karena bertugas membuang hasil metabolisme protein yang tidak terpakai. Jika kadar protein terlalu tinggi, akan menyebabkan kurang kalsium dan osteoporosis, sulit buang air besar. Karena protein merupakan makanan pembentuk asam, kelebihan asupan protein akan meningkatkan kadar keasaman tubuh, khususnya keasaman darah dan jaringan. Kondisi ini disebut asidosis yang ditandai dengan gangguan pencernaan, seperti kembung, sakit mag, sembelit, merupakan gejala awal asidosis.

Kekurangan protein juga tidak baik bagi tubuh, menyebabkan penyusutan jaringan otot, edema, denyut jantung lemah, kwashiorkor, mata cekung, daya otak lemah dan jika kekurangan protein diiringi kekurangan kalori menyebabkan penyakit marasmus.

## B. ASAM AMINO

### 1. Definisi dan Struktur Asam Amino

Asam amino adalah unit dasar dari struktur protein. Semua asam amino sekurang-kurangnya mempunyai satu gugus asam karboksil (-COOH) satu gugus amino (-NH<sub>2</sub>) pada posisi alfa dari rantai karbon yang asimetris, sehingga dapat terjadi beberapa isomer. Walaupun lebih dari 100 jenis asam amino yang berbeda yang telah diisolasi dari bahan-bahan biologi, tapi hanya ada 25 jenis yang sering dijumpai dalam protein. Dengan adanya dua gugusan tersebut, asam amino dapat bertindak sebagai buffer yang berfungsi menahan perubahan pH. Seperti halnya karbohidrat sederhana, asam amino mempunyai sifat optik aktif dengan adanya isomerisasi. Asam amino dalam larutan bersifat amfoter yaitu dapat bereaksi dengan asam basa tergantung dari lingkungannya. Struktur asam amino terdapat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.6. Struktur Dasar Asam Amino

## 2. Sifat Asam Amino

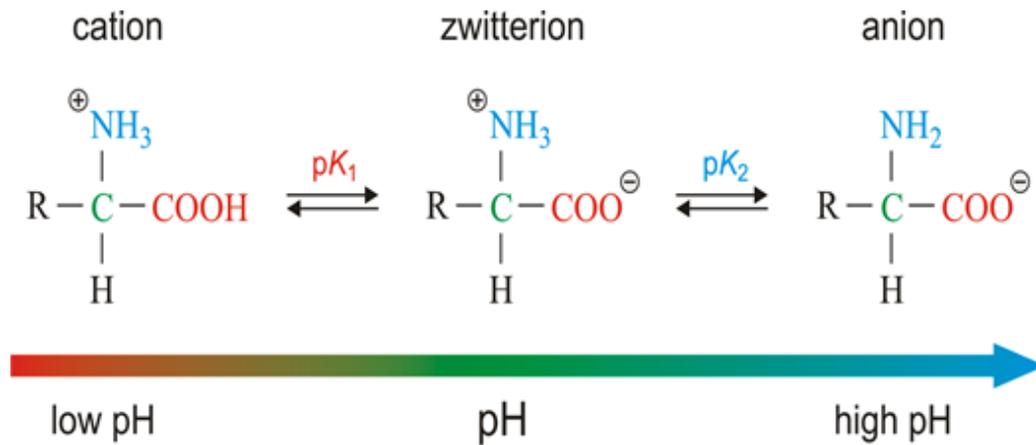
Asam amino memiliki beberapa sifat sebagai berikut :

### a. Amfoter

Gugus fungsional pada asam amino, yaitu karboksil dan amina, keduanya mempengaruhi sifat keasaman asam amino. Dengan demikian, asam amino dapat bereaksi dengan asam maupun basa sehingga dikatakan bersifat amfoter atau amfiprotik. Sifat amfoter ini tampak pada asam amino yang hanya mengikat satu gugus  $-\text{COOH}$  dan satu gugus  $-\text{NH}_2$ . Adapun asam amino yang mengikat lebih dari satu gugus  $-\text{COOH}$  dan hanya satu gugus  $-\text{NH}_2$ , akan lebih bersifat asam.

### b. Ion Zwitter

Pada asam amino, ada gugus yang dapat melepaskan ion  $\text{H}^+$  dan ada gugus yang dapat menerima ion  $\text{H}^+$ . Akibatnya, terbentuk molekul yang memiliki dua jenis muatan, yaitu muatan positif dan muatan negatif. Molekul seperti ini, dikenal sebagai ion zwitter atau kadang-kadang disebut juga sebagai ion dipolar.



Gambar 3.7. Zwitter-Ion Asam Amino

c. *Optis Aktif*

Semua asam amino kecuali glisin, memiliki atom C asimetris atau atom C kiral, yaitu atom C yang mengikat empat gugus yang berbeda (gugus -H, -COOH, -NH<sub>2</sub>, dan -R). Oleh karena itu, semua asam amino (kecuali glisin) bersifat optis aktif. Artinya, senyawa tersebut dapat memutar bidang polarisasi cahaya.

### 3. Klasifikasi Asam Amino

Berdasarkan struktur kimia, asam amino digolongkan menjadi :

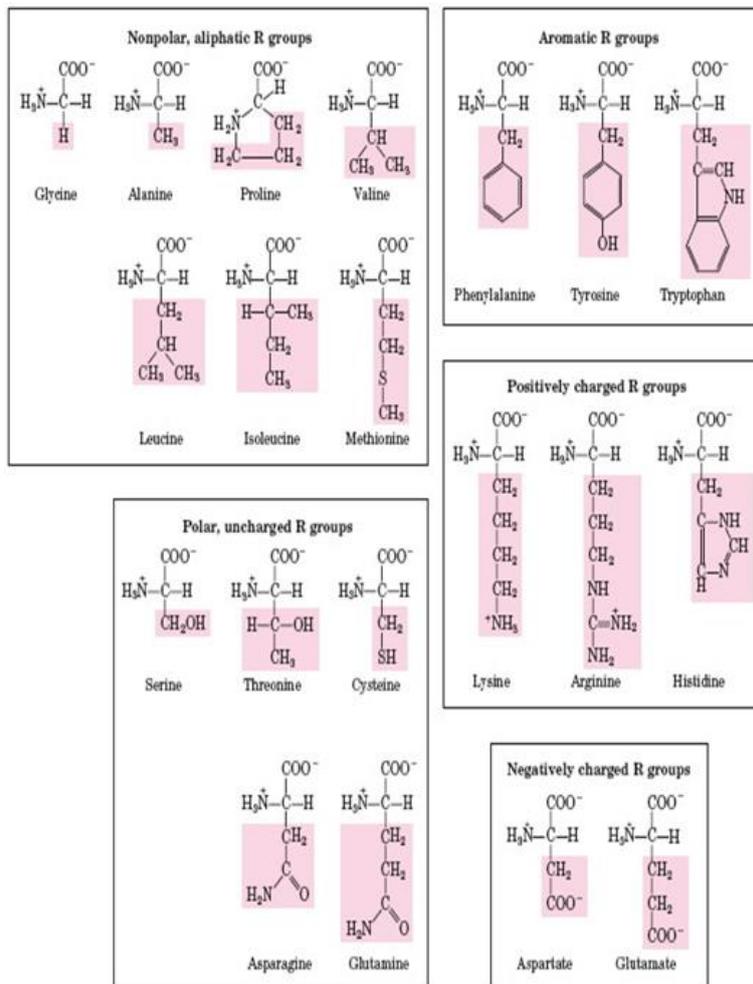
- a. Kelompok asam amino **Monoamino-monokarboksilat** : glisin, alanin, serin, treonin, valin, leusin, dan isoleusin.
- b. Kelompok asam amino yang mengandung **sulfur** : metionin, sistin, dan sistein.
- c. Kelompok asam amino **monoamino-dikarboksilat** : asam aspartat dan asam glutamat.
- d. Kelompok asam amino **dasar** : lisin, arginin, hidroksiprolin, dan histidin.
- e. Kelompok asam amino **aromatik** : fenilalanin dan treonin
- f. Kelompok asam amino **heterosiklik** : triptofan, prolin, dan hidroksiprolin.

### 4. Fungsi Asam Amino

Fungsi asam amino diantaranya :

- a. Asam amino menduduki posisi penting dalam metabolisme sel. Hampir semua reaksi biokimia dikatalis oleh enzim yang terdiri dari residu asam amino. Asam amino sangat esensial untuk metabolisme karbohidrat dan lipid dan untuk sintesis jaringan protein.
- b. Penyusun senyawa penting seperti adrenalin, tyrosin, melanin, histamin, pofirin, hemoglobin, pirimidin, purin, asam nukleat, choline, asam folic, asam nikotin, vitamin, taurine, garam empedu dan sebagai sumber energi metabolis.

*Pengelompokkan Berdasarkan Rantai Sampingnya*



**LATIHAN**

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

- 1) Sebutkan jenis – jenis protein !
- 2) Jelaskan fungsi protein sebagai enzim dan hormon !
- 3) Sebutkan dan jelaskan beberapa sifat asam amino !
- 4) Jelaskan mengenai proses sintesis protein !

*Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Jenis – jenis protein
  - a) Kolagen, protein struktur yang diperlukan untuk membentuk kulit, tulang dan ikatan tisu.
  - b) Antibodi, protein sistem pertahanan yang melindungi badan daripada serangan penyakit.

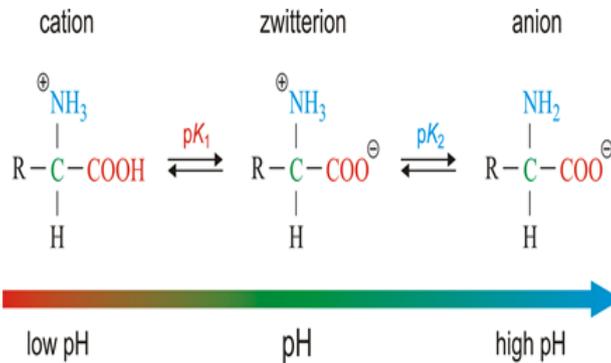
- c) Dismutase superoxide, protein yang membersihkan darah kita.
  - d) Ovulbumin, protein simpanan yang memelihara badan.
  - e) Hemoglobin, protein yang berfungsi sebagai pembawa oksigen
  - f) Toksin, protein racun yang digunakan untuk membunuh kuman.
  - g) Insulin, protein hormon yang mengawal aras glukosa dalam darah.
  - h) Tripsin, protein yang mencernakan makanan protein.
- 2) a) Protein sebagai enzim
- Enzim adalah biokatalisator atau katalisator berbagai reaksi biokimia. Semuanya merupakan molekul protein dan lebih dari 200 jenis, bekerja menjalankan reaksi biokimia di dalam maupun diluar sel. Enzim yang bekerja di dalam sel disebut enzim intraseluler dan yang bekerja diluar sel disebut ekstraseluler. Amilase, protease, lipase saluran pencernaan adalah contoh enzim intraseluler sedangkan enzim kinase, oksidoreduktase dan transferase yang bekerja pada berbagai jalur metabolisme merupakan contoh dari enzim intraseluler.
- b) Protein sebagai hormon
- Tidak semua hormon merupakan senyawa protein atau peptida, ada yang merupakan senyawa steroid, amina atau peptida. Hormon yang disekresi oleh hipotalamus, hipofisis dan pankreas semuanya merupakan hormon peptida. Insulin adalah salah satu contoh hormon peptida, dengan massa molekul sekitar 6000 Dalton. Molekul insulin tersusun oleh dua rantai polipeptida, karena itu disebut protein dimerik. Rantai A insulin pada berbagai spesies umumnya terdiri dari 21 asam amino, sedangkan rantai B tersusun oleh 30 asam amino. Antara rantai A dan rantai B terdapat 2 jembatan disulfida yaitu antara A7 dengan B7, dan A20 dengan B19. Insulin merupakan hormon yang berperan dalam mengatur kadar gula darah dan memfasilitasi transport glukosa ke dalam sel. Defisiensi insulin akan menyebabkan hiperglikemia sebab transport gula ke dalam sel terhambat.
- 3) Sifat Asam Amino

**Asam amino memiliki beberapa sifat sebagai berikut :**

- 1) Amfoter
- Gugus fungsional pada asam amino, yaitu karboksil dan amina, keduanya memengaruhi sifat keasaman asam amino. Dengan demikian, asam amino dapat bereaksi dengan asam maupun basa sehingga dikatakan bersifat amfoter atau amfiprotik. Sifat amfoter ini tampak pada asam amino yang hanya mengikat satu gugus -COOH dan satu gugus -NH<sub>2</sub>. Adapun asam amino yang mengikat lebih dari satu gugus -COOH dan hanya satu gugus -NH<sub>2</sub>, akan lebih bersifat asam.

2) Ion Zwitter

Pada asam amino, ada gugus yang dapat melepaskan ion H<sup>+</sup> dan ada gugus yang dapat menerima ion H<sup>+</sup>. Akibatnya, terbentuk molekul yang memiliki dua jenis muatan, yaitu muatan positif dan muatan negatif. Molekul seperti ini, dikenal sebagai ion zwitter atau kadang-kadang disebut juga sebagai ion dipolar.



Gambar..... Zwitter-ion asan amino

3) Optis Aktif

Semua asam amino kecuali glisin, memiliki atom C asimetris atau atom C kiral, yaitu atom C yang mengikat empat gugus yang berbeda (gugus -H, -COOH, -NH<sub>2</sub>, dan -R). Oleh karena itu, semua asam amino (kecuali glisin) bersifat optis aktif. Artinya, senyawa tersebut dapat memutar bidang polarisasi cahaya.

4) Sintesis protein, yaitu proses penyusunan senyawa protein dengan membentuk rangkaian rantai polipeptida. Sintesis protein ini terjadi di dalam ribosom dan pengaturan sintesis protein dilakukan oleh gen (DNA) di dalam inti.

Secara garis besar, tahapan proses sintesis protein antara lain seperti berikut :

1) Transkripsi

DNA membuka menjadi 2 rantai terpisah. Karena mRNA berantai tunggal, maka salah satu rantai DNA ditranskripsi (dicopy). Rantai yang ditranskripsi dinamakan DNA sense atau template dan kode genetik yang dikode disebut kodogen. Sedangkan yang tidak ditranskripsi disebut DNA antisense/komplementer. RNA Polimerase membuka pilinan rantai DNA dan memasukkan nukleotida-nukleotida untuk berpasangan dengan DNA sense sehingga terbentuklah rantai mRNA. Contoh transkripsi:

2) Translasi

mRNA/RNAd yang sudah terbentuk keluar dari anak inti sel menuju rRNA. Disana mRNA masuk ke rRNA/RNAr diikuti oleh tRNA/RNAt. Ketika antikodon pada tRNA cocok dengan kodon mRNA kemudian rantai bergeser ke tengah. Kodon mRNA berikutnya dicocokkan dengan tRNA kemudian asam amino yang pertama berikatan dengan asam amino kedua. tRNA pertama keluar dari rRNA. Proses ini berlangsung

hingga kodon stop, ribosom subunit besar dan kecil terpisah, mRNA dan tRNA keluar dari ribosom. Kodon stop : UAA, UAG, UGA

## RINGKASAN

Protein merupakan makromolekul yang menyusun lebih dari separuh bagian dari sel. Protein menentukan ukuran dan struktur sel, komponen utama dari sistem komunikasi antar sel serta sebagai katalis berbagai reaksi biokimia di dalam sel. Protein merupakan polimer dari asam amino, disebut juga polipeptida. Antar asam amino terdapat ikatan peptida, yaitu ikatan antara gugus karboksil suatu asam amino dengan gugus amino dari asam amino lain.

Sintesis protein, yaitu proses penyusunan senyawa protein dengan membentuk rangkaian rantai polipeptida. Sintesis protein ini terjadi di dalam ribosom dan pengaturan sintesis protein dilakukan oleh gen (DNA) di dalam inti. Denaturasi protein adalah proses perubahan struktur lengkap dan karakteristik bentuk protein akibat dari gangguan interaksi sekunder, tersier, dan kuartener struktural seperti suhu, penambahan garam, enzim dll.

Asam amino adalah unit dasar dari struktur protein. Semua asam amino sekurang-kurangnya mempunyai satu gugus asam karboksil (-COOH) satu gugus amino (-NH<sub>2</sub>) pada posisi alfa dari rantai karbon yang asimetris, sehingga dapat terjadi beberapa isomer. Asam amino menduduki posisi penting dalam metabolisme sel. Hampir semua reaksi biokimia dikatalis oleh enzim yang terdiri dari residu asam amino dan penyusun senyawa penting seperti adrenalin, tyrosin, melanin, histamin, pofirin, hemoglobin, pirimidin, purin, asam nukleat, choline, asam folic, asam nikotin, vitamin, taurine, garam empedu dan sebagai sumber energi metabolis.

## TES 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Protein merupakan senyawa polimer, monomer penyusunnya adalah :
  - A. Triasilgliserol
  - B. Glukosa
  - C. Asam amino
  - D. Sukrosa
  
- 2) Ikatan–ikatan yang menghubungkan monomer-monomer dalam molekul protein disebut ikatan :
  - A. Kovalen
  - B. Glikosidik
  - C. Fosfodiester
  - D. Peptida

- 3) Senyawa berikut termasuk golongan protein adalah :
- A. Asam amino
  - B. Hemoglobin
  - C. Glikogen
  - D. Triasilgliserol
- 4) Dibawah ini merupakan penggolongan protein berdasarkan strukturnya yaitu :
- A. Struktur makro
  - B. Struktur mikro
  - C. Struktur sekunder
  - D. Struktur hidrogen
- 5) Protein yang tidak larut dalam larutan netral, larut asam dan basa encer adalah :
- A. Histon
  - B. Globulin Glutelin
  - C. Albumin
  - D. Prolamin
- 6) Jenis protein yang termasuk struktur sekunder adalah:
- A. Alpha-Sheets
  - B. Alpha-Sheets dan Beta-Heliks
  - C. Beta-Heliks
  - D. Alpha-Heliks dan Beta-Sheets
- 7) Dibawah ini merupakan sifat asam amino, *kecuali*:
- A. Ion Zwitter
  - B. Ikatan Peptida
  - C. Amfoter
  - D. Optis Aktif
- 8) Asam amino yang mengandung sulfur antara lain :
- A. arginin, hidroksiprolin, dan histidin.
  - B. metionin, sistin, dan histidin.
  - C. metionin, alanin dan sistein.
  - D. metionin, sistin, dan sistein.
- 9) Hidroksiprolin termasuk kelompok asam amino :
- A. Aromatik
  - B. Heterosiklik
  - C. Dasar
  - D. Monoamino-dikarboksilat

- 10) Di bawah ini adalah jenis protein yang termasuk nonpolar berdasarkan rantai sampingnya, yaitu :
- A. Valine
  - B. Tyrosin
  - C. Glutamate
  - D. Aspartate

## Topik 2 Metabolisme Asam Amino

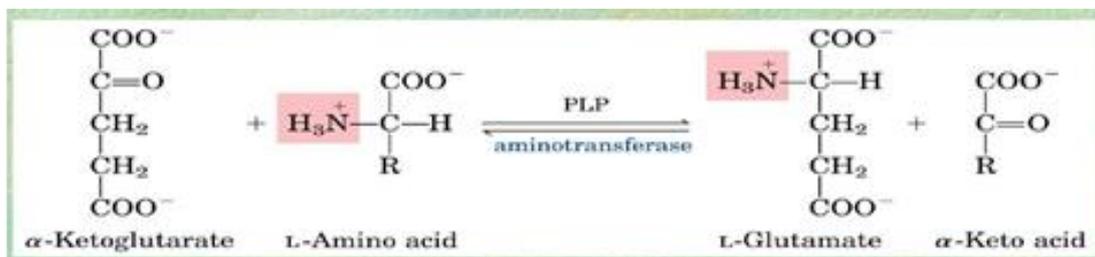
Asam amino adalah “*building blocks*” senyawa-senyawa protein yang ada di dalam tubuh makhluk hidup. Ada 20 asam amino penyusun protein yaitu yang esensial dan non esensial. Tubuh manusia dapat mensintesis 10 dari 20 asam amino yang diperlukan untuk membentuk protein. Dari 10 asam amino non-esensial tersebut 8 diantaranya disintesis dari senyawa-senyawa antara amfibolik jalur glikolisis dan siklus Krebs sedangkan 2 lainnya disintesis dari asam amino esensial yang diperoleh dari makanan.

Tahap awal reaksi metabolisme asam amino melibatkan pelepasan gugus amino, kemudian baru perubahan kerangka karbon pada molekul asam amino. Dua proses utama pelepasan gugus asam amino, yaitu transaminasi dan deaminasi.

### A. TRANSAMINASI

Transaminasi ialah proses katabolisme asam amino yang melibatkan pemindahan gugus amino dari satu asam amino kepada asam amino lain. Dalam reaksi transaminasi ini gugus asam amino dari suatu asam amino dipindahkan kepada salah satu dari tiga senyawa keto, yaitu asam piruvat, α ketoglutarat atau oksaloasetat, sehingga senyawa keto ini diubah menjadi asam amino, sedangkan asam amino semula diubah menjadi asam keto. Ada dua enzim penting dalam reaksi transaminasi yaitu enzim transaminase dan enzim transaminase yang bekerja sebagai katalis dalam reaksi berikut :

Reaksi transaminasi bersifat reversible. Pada reaksi ini tidak ada gugus amino yang hilang, karena gugus amino yang dilepaskan oleh asam amino diterima oleh asam keto. Alanin transaminase merupakan enzim yang mempunyai kekhasan terhadap asam piruvat-alanin sebagai satu pasang substrat, tetapi tidak terhadap asam-asam amino yang lain. Dengan demikian enzim transaminase dapat mengubah berbagai jenis asam amino menjadi piruvat, selama tersedia asam keto. Glutamat transaminase merupakan enzim yang mempunyai kekhasan terhadap enzim-ketoglutarat sebagai satu pasang substrat, karena itu enzim ini dapat mengubah asam amino menjadi asam keto.



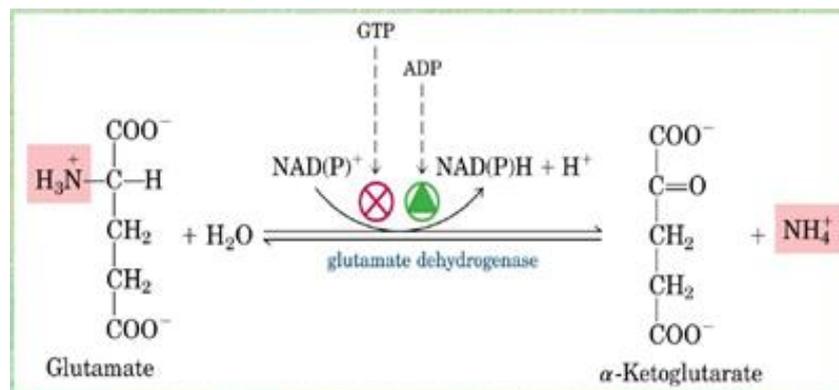
Gambar 3.8 Enzim yang bekerja sebagai katalis

Dari reaksi-reaksi diatas dapat dilihat bahwa walaupun ada beberapa jalur reaksi 115nticonon115se, namun asam ketoglutarat merupakan akseptor gugus amino yang terakhir. Dengan demikian hasil reaksi 115nticonon115se keseluruhan ialah asam 115nticonon.

Reaksi 115nticonon115se ini terjadi dalam mitokondria maupun dalam cairan sitoplasma. Semua enzim transaminase tersebut dibantu oleh piridoksalfosfat sebagai koenzim. Telah diterangkan bahwa piridoksalfosfat tidak hanya merupakan koenzim pada rekasi 115nticonon115se, tetapi juga pada reaksi-reaksi 115nticonon115 yang lain.

## B. DEAMINASI

Pada reaksi ini dapat dijumpai dua tipe atau sub jalur yaitu yang bersifat oksidatif dan lainnya non-oksidatif. Yang pertama masih dibedakan atas dasar koenzim yang membantu aktivitas enzim yaitu  $\text{NAD}^+$  (atau  $\text{NADP}^+$ ) atau FAD (atau FMN). Enzim yang dibantu oleh NAD bernama dengan akhiran 115nticonon115se115 sedangkan yang dibantu dengan gugus prostetis FAD/FMN dinamakan oksidase.



### 1. Deaminasi oksidatif

L-Glutamat yang berhasil mengumpulkan gugus amino pada reaksi 116nticonon116se dapat melepaskannya melalui reaksi deaminasi oksidatif. Enzim yang mengkatalisis reaksi ini adalah L-glutamat 116nticonon116se116 yang dibantu oleh NAD (atau  $\text{NADP}^+$ ). Reaksinya diduga berlangsung dalam dua tahap yaitu dehidrogenasi dan hidrolisis.

NADH yang terbentuk pada tahap pertama dioksidasi melalui rantai transport 116nticonon-oksigen. Hasil 116nticonon oksidasi ini disimpan dalam ATP.

L-Glutamat 117nticonon116se116 adalah enzim allosetrik yang dihambat oleh modulator spesifik yaitu ATP, GTP, dan NADH dan dipacu aktivitasnya oleh ADP, GDP dan bebrapa asam amino, aktifitasnya juga dipengaruhi oleh hormon tiroksin dan beberapa 116nticonon steroid.

### 2. Deaminasi nonoksidatif

Deaminasi non oksidatif ialah perubahan L-serin menjadi asam piruvat yang di katalis oleh serin dehidratase, perubahan treonin menjadi  $\alpha$ -ketobutirat oleh treonin dehidratase

dan lain-lain reaksi yang sejenis . Golongan enzim ini mengandung piridoksal-P sebagai gugus prostetisnya.

a. Siklus Urea

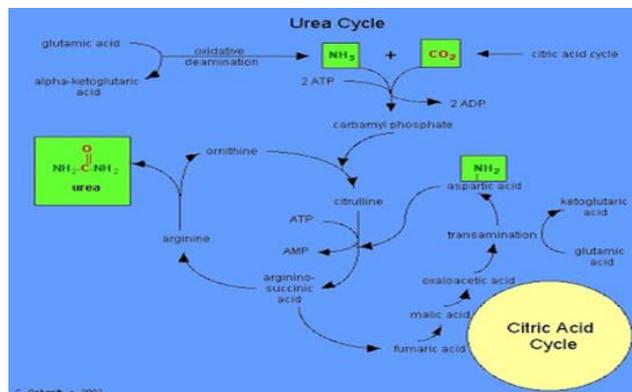
Siklus urea merupakan pelepasan gugus NH<sub>4</sub> pada asam amino dalam bentuk amoniak melalui reaksi transaminase dan deaminasi, kemudian dikeluarkan dalam bentuk urea dari urine.

Dari uraian tentang 117nticodon117 asam amino telah diketahui bahwa NH<sub>4</sub> dapat dilepaskan dari asam amino melalui reaksi transaminase dan deaminasi. Pada reaksi transaminase, gugus – NH<sub>4</sub> yang dilepaskan diterima oleh suatu asam keto sehingga terbentuk asam amino baru dan asam keto lain.

Dari uraian metabolisme asam amino telah diketahui bahwa NH<sub>4</sub> dapat dilepaskan dari asam amino melalui reaksi 117nticodon117se, deaminasi, dan dekarboksilasi. Pada reaksi transaminase gugus NH<sub>4</sub> yang dilepaskan diterima oleh asam keto, sehingga terbentuk asam amino baru dan asam keto lain. Sedangkan pada reaksi deaminasi, gugus NH<sub>4</sub> dilepaskan dalam bentuk ammonia yang kemudian dikeluarkan dari dalam tubuh dalam bentuk urea dalam urine. Amonia dengan kadar yang tinggi merupakan racun dalam tubuh manusia.

Hans Krebs dan Kurt Henseleit pada tahun 1932 mengemukakan serangkaian reaksi kimia tentang pembentukan urea. Mereka berpendapat bahwa urea terbentuk dari ammonia dan karbondioksida melalui serangkaian reaksi kimia yang berbentuk siklus, yang mereka namakan siklus urea. Pembentukan urea ini terutama berlangsung dalam hati. Urea adalah suatu senyawa yang mudah larut dalam air, bersifat netral, terdapat dalam urine yang dikeluarkan dari dalam tubuh.

Reaksi pertama adalah sintesis karbamoil fosfat. Kondensasi 1 mol masing-masing ion 117nticodon, karbon dioksida, dan fosfat (yang berasal dari ATP) untuk membentuk karbamoil fosfat dikatalisis oleh karbamoil fosfat sintase, enzim yang terdapat dalam mitokondria hati organisme 117nticodon. Dua mol ATP yang dihidrolisis selama reaksi ini menyediakan tenaga penggerak untuk sintesis 2 ikatan kovalen-ikatan amida dan ikatan campuran asam karboksilat-asam fosfat anhidrida dari karbamoil fosfat. Di samping Mg<sup>2+</sup> suatu asam dikarboksilat, lebih disukai N-asetilglutamat. Peranan tepat Nasetilglutamat tidak diketahui dengan pasti.



Gambar 3.9. Siklus urea

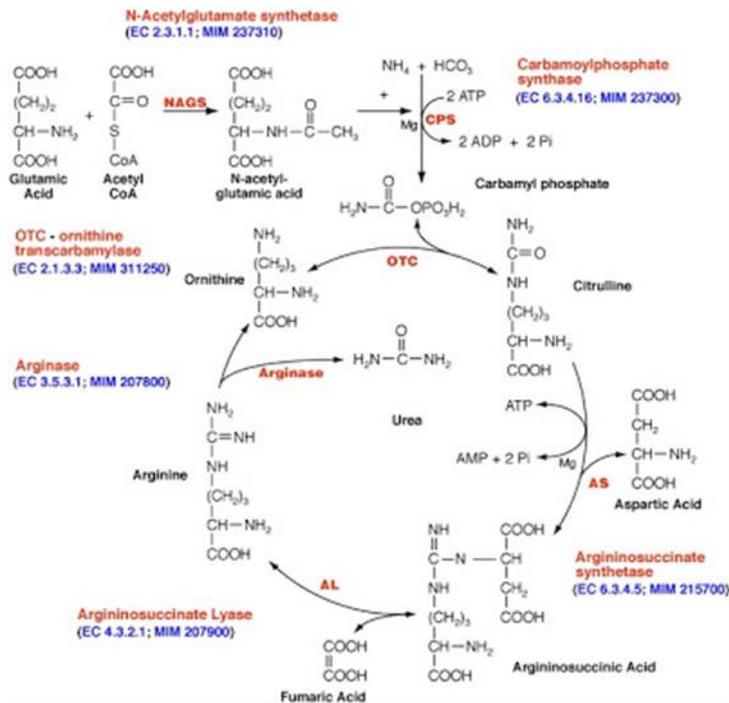
Kehadiran siklus urea menyebabkan banyak perubahan konformasional (penyesuaian bentuk) dalam struktur karbamoil fosfat sintase yang membuka (expose) gugus sulfidril tertentu, menyembunyikan gugus lainnya, dan mempengaruhi afinitas enzim untuk ATP.

Reaksi kedua adalah sintesis sitrulin. Pemindahan gugus karbamoil dari karbamoil fosfat ke ornitin, membentuk sitrulin + Pi, dikatalisis oleh L-ornitin transkarbamoilase mitokondria hati. Reaksi sangat spesifik untuk ornitin dan keseimbangan cenderung kuat ke sintesis sitrulin.

Reaksi ketiga adalah sintesis argininosuksinat. Dalam reaksi argininosuksinat sintase, 118nticodon dan sitrulin diikat bersamaan melalui gugus amino 118nticodon. Reaksi membutuhkan ATP, dan keseimbangan cenderung kuat ke sintesis argininosuksinat.

Reaksi keempat adalah pembelahan argininosuksinat menjadi 118nticodon dan fumarat. Pembelahan 118nticodon118 arininosuksinat menjadi 118nticodon + fumarat dikatalisis oleh argininosuksinase, suatu enzim hati dan jaringan ginjal. Reaksi berlangsung melalui mekanisme pembuangan trans. Fumarat yang dibentuk dapat dikonversi menjadi oksaloasetat melalui reaksi fumarase dan melat 118nticodon118se118 dan selanjutnya ditransaminasi untuk membentuk kembali (regenerasi) 118nticodon.

Reaksi kelima adalah pembelahan 118nticodon menjadi ornitin dan urea. Reaksi ini menyempurnakan siklus urea dan membentuk kembali (regenerasi ornitin), substrat untuk reaksi 2. Pembelahan hidrolitik gugus 118nticodon dari 118nticodon dikatalisis oleh arginase, yang terdapat dalam hati semua organisme 119nticodon. Dalam jumlah yang lebih kecil, arginase juga terdapat dalam jaringan ginjal, otak, kelenjar mammae, jaringan testikuler dan kulit. Arginase hati mamalia diaktifkan oleh  $Co^{2+}$  atau  $Mn^{2+}$  Ornitin dan lisin merupakan penghambat kuat yang bersaing dengan 119nticodon.



Gambar 3.10. Enzim yang berperan pada siklus urea

Tahapan secara lengkap siklus urea dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel  
Tahapan reaksi kimia pada siklus urea

Reaksi kimia pada siklus urea				
Step	Reaktan	Produk	Enzim	Lokasi
1.	$\text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + 2\text{ATP}$	carbamoyl phosphate + 2ADP + $\text{P}_i$	CPS1	mitochondria
2.	carbamoyl phosphate + ornithine	citrulline + $\text{P}_i$	OTC	mitochondria
3.	citrulline + aspartate + ATP	argininosuccinate + AMP + $\text{PP}_i$	ASS	cytosol
4.	argininosuccinate	Arg + fumarate	ASL	cytosol
5.	Arg + $\text{H}_2\text{O}$	ornithine + urea	ARG1	cytosol

Keterangan:

$\text{P}_i$  : Ortofosfat atau fosfat anorganik

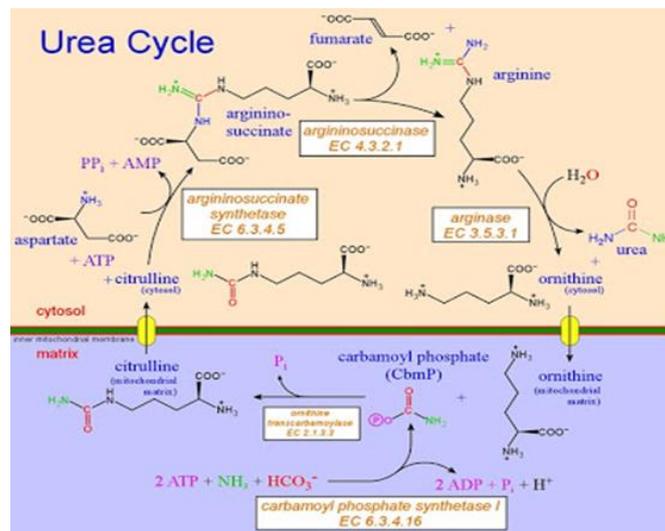
CPS-1 : enzim carbamoyl phosphate synthetase I

OTC : enzim Ornithine transcarbamoylase

ASS : enzim argininosuccinate synthetase

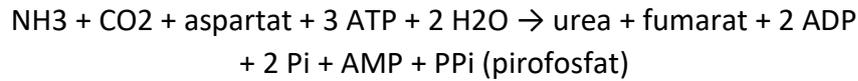
ASL: enzim argininosuccinate lyase

ARG1 : enzim arginase 1

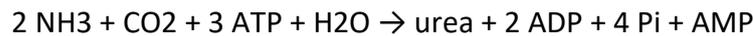


Gambar3.11. Siklus urea berlangsung di mitokondria dan sitosol.

Reaksi secara keseluruhan dari siklus urea adalah :



Karena fumarat diperoleh dari menghilangkan  $\text{NH}_3$  pada aspartat (step 3 dan 4 pada tabel) dan  $\text{PPi} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Pi}$ , maka persamaan reaksi kimianya dapat disederhanakan menjadi :



*b. Peranan Siklus Urea Dalam Tubuh*

Asam amino yang berasal protein dalam makanan diabsorpsi melalui transpor aktif dan dibawa ke hati. Di hati, asam amino disintesis menjadi molekul protein atau dilepas ke dalam sirkulasi untuk ditranspor ke dalam sel lain. Setelah memasuki sel-sel tubuh, asam amino bergabung dengan ikatan peptida untuk membentuk protein seluler yang dipakai untuk pertumbuhan dan regenerasi jaringan. Hanya ada sedikit simpanan asam amino dalam sel-sel tubuh, kecuali sel-sel hati. Protein intraseluler tubuh sendiri terus terhidrolisis menjadi asam amino dan disintesis ulang menjadi protein. Asam amino dari makanan dan asam amino dari penguraian protein intraseluler membentuk kelompok asam amino utama yang memenuhi kebutuhan tubuh.

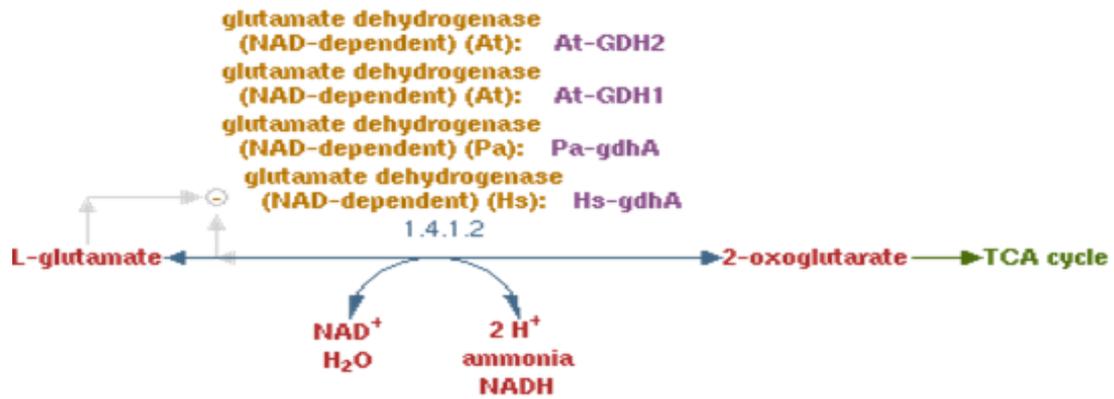
Penguraian asam amino untuk energi berlangsung di hati. Jika sel telah mendapatkan protein yang mencukupi kebutuhannya, setiap asam amino tambahan akan dipakai sebagai energi atau disimpan sebagai lemak. Urea tidak diputus oleh enzim manusia. Namun, bakteri, termasuk bakteri yang terdapat dalam saluran cerna manusia, dapat memutuskan urea menjadi amonia dan  $\text{CO}_2$ . (urease, enzim yang mengkatalisis reaksi ini, merupakan enzim pertama yang dapat dikristalisasi).

Sampai tahap tertentu, manusia mengekskresikan urea ke dalam usus dan air liur. Bakteri usus mengubah urea menjadi amonia. Amonia ini dan amonia yang dihasilkan oleh reaksi bakteri lain di dalam usus, diserap masuk ke dalam vena porta hepatica. Dalam keadaan normal, amonia ini diekstraksi oleh hati dan diubah menjadi urea.

## **C. KATABOLISME GLUTAMATE, LEUSIN, ALANIN, SISTEIN, DAN TIROSIN**

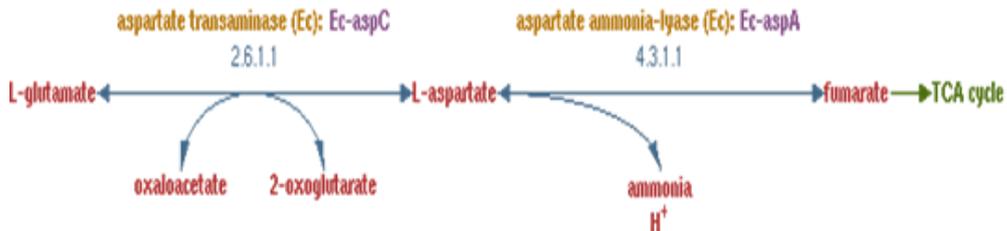
### **1. Katabolisme Glutamat**

Asam amino glutamat ini memiliki beberapa jalur degradasi yang menghasilkan senyawa-senyawa berbeda yang berperan dalam proses TCA. Senyawa-senyawa antara ini dapat diubah menjadi glukosa melalui jalur glukoneogenesis.

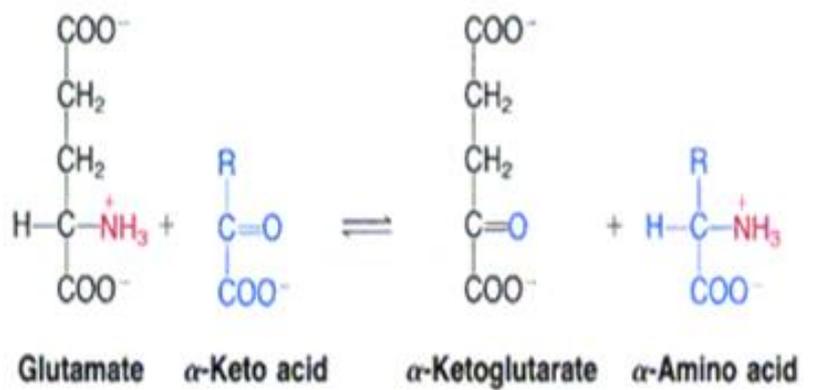


Gambar 3.12. Jalur Degradasi Glutamate 1

Reaksi degradasi glutamate I ini adalah reaksi deaminasi yang dikatalisis oleh enzim glutamate dehidrogenase (GDHs). GDHs mengkatalisis reaksi reversibel, dan terlibat dalam kedua fungsi anabolik dari biosintesis glutamat dan fungsi katabolik pemanfaatan glutamat, tergantung pada organisme dan kondisi. Dalam beberapa organisme, enzim tunggal dapat mengkatalisis kedua fungsi dalam kondisi fisiologis yang berbeda. Aktivitas GDHs ini dikendalikan oleh ADP-ribosylation. Regulasi berpengaruh terhadap pembatasan kalori dan kadar glukosa yang rendah dalam darah. Dalam keadaan ini, aktivitas glutamat dehidrogenase dinaikkan untuk meningkatkan jumlah  $\alpha$ -Ketoglutarate yang dapat digunakan untuk menyediakan energi yang digunakan dalam siklus asam sitrat untuk memproduksi ATP. Peningkatan enzim GDHs di dalam hati akan menyebabkan kerusakan pada sel saraf.

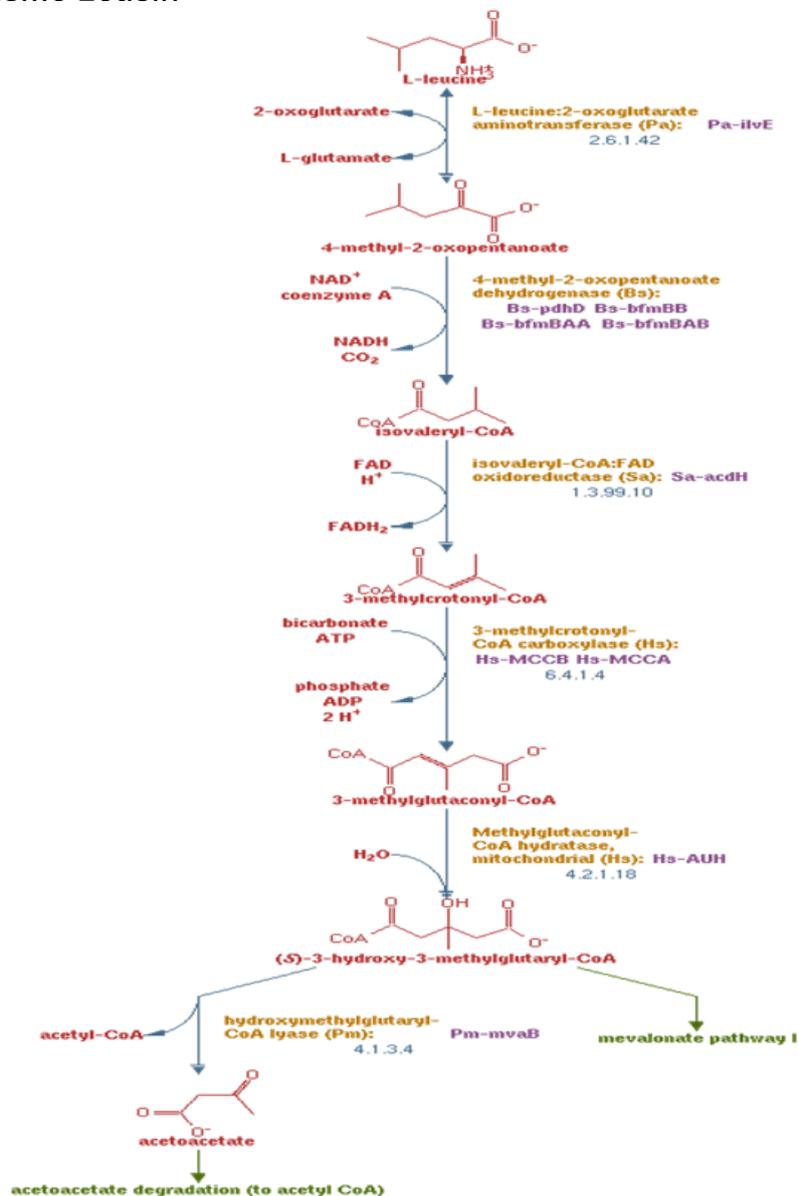


Gambar 3.13 Jalur Degradasi Glutamate 2



Reaksi degradasi yang kedua adalah reaksi transaminase yaitu pemindahan gugus  $\alpha$ -amino dari suatu L-amino. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim aspartat transaminase. L-aspartat yang dihasilkan dapat mengalami reaksi lebih lanjut menghasilkan senyawa fumarat yang dikatalisis oleh aspartat ammonia-liase. Selain itu, reaksi transaminase lainnya dari glutamat akan menghasilkan  $\alpha$ -ketoglutarat dengan enzim aminotransferase yaitu aspartat transaminase. Enzim aspartat transaminase yang berperan dalam reaksi transaminase ini sering ditemukan di hati, jantung, otot, ginjal, dan otak. Enzim ini akan dilepaskan ke dalam serum jika salah satu dari organ-organ tersebut rusak. Peningkatan jumlah enzim ini pada serum dapat menyebabkan beberapa masalah kronis, di antaranya hepatitis viral akut dan nekrosis hati.

## 2. Katabolisme Leusin



Gambar 3.14. Tahap Katabolisme Leusin

Asam amino Leusin juga memiliki banyak jalur degradasi. Salah satunya adalah seperti yang digambarkan di samping. Katabolisme leusin berlangsung di otot dan menghasilkan NADH and FADH<sub>2</sub> yang dapat diubah menjadi ATP. Tahap pertama adalah transaminasi menggunakan BCAA aminotransferase dengan  $\alpha$ -ketoglutarate sebagai reseptor. Proses ini menghasilkan  $\alpha$ -ketoisocaproate (4-metil-2-oksopentanoat) yang kemudian dioksidasi dengan  $\alpha$ -keto acid dehydrogenase (BCKD) menghasilkan isovaleryl CoA. Selanjutnya terjadi dehidrogenasi menghasilkan  $\beta$ -methylcrotonyl CoA oleh isovaleryl CoA dehydrogenase.  $\beta$ -methylcrotonyl CoA dikaboksilasi oleh biotin mengandung enzim yang disebut methylcrotonyl CoA carboxylase untuk membentuk  $\beta$ -methylglutaconyl CoA. Selanjutnya terjadi hidratisasi oleh  $\beta$ -methylglutaconyl CoA. Hydratase untuk membentuk  $\beta$ -hydroxy- $\beta$ -methylglutaryl CoA. Senyawa ini diubah menjadi acetylCoA dan acetoacetylCoA menggunakan enzim HMG-CoA lyase.

Kegagalan metabolisme BCAA menyebabkan defek pada BCKD. Hal ini menyebabkan asam  $\lambda$  keto terakumulasi dan disekresikan melalui urine. Penyakit ini disebut *Maple syrup urine disease* karena bau khas dari urine tersebut. Penyakit ini menyebabkan retardasi mental.

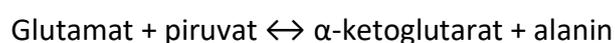
Pada degradasi Leusin ini juga terlibat enzim *methylcrotonyl-CoA carboxylase*. Kekurangan enzim ini bisa juga disebut 3-Methylcrotonylglycinuria type 1 atau *BMCC deficiency*. Penyakit ini merupakan penyakit bawaan dimana tubuh tidak mampu untuk memproses protein dengan baik. Gejala dari penyakit ini antara lain susah makan, diare, kelelahan yang berlebihan, dan hypotonia. Jika tidak segera diobati, pasien akan menderita stroke bahkan koma. Deteksi dini dan mengkonsumsi makanan berprotein rendah dapat membantu agar gejala tidak semakin memburuk. Gejala-gejala dari defisiensi enzim ini mirip dengan sindrom Reye.

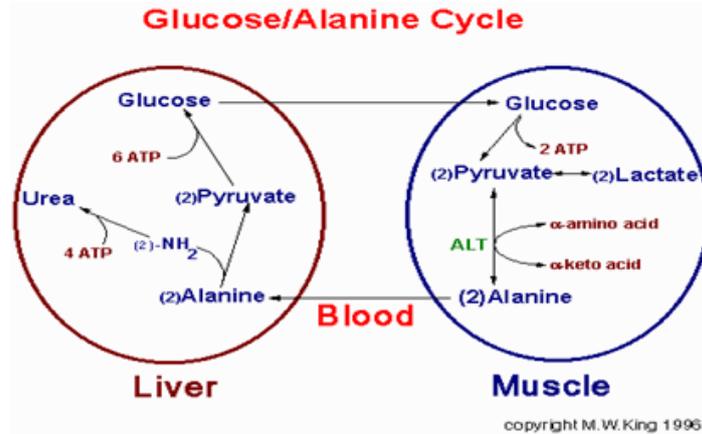
### 3. Katabolisme Alanin

Alanin dipindahkan ke sirkulasi oleh berbagai jaringan, tetapi umumnya oleh otot. Alanin dibentuk dari piruvat. Hati mengakumulasi alanin plasma, kebalikan transaminasi yang terjadi di otot dan secara proporsional meningkatkan produksi urea. Alanin dipindahkan dari otot ke hati bersamaan dengan transportasi glukosa dari hati kembali ke otot. Proses ini dinamakan siklus glukosa-alanin. Fitur kunci dari siklus ini adalah bahwa dalam 1 molekul, alanin, jaringan perifer mengeksport piruvat dan amonia ke hati, di mana rangka karbon didaur ulang dan mayoritas nitrogen dieliminasi.

Ada 2 jalur utama untuk memproduksi alanin otot yaitu:

1. Secara langsung melalui degradasi protein
2. Melalui transaminasi piruvat dengan bantuan enzim alanin transaminase, ALT (juga dikenal sebagai serum glutamat-piruvat transaminase, SGPT).

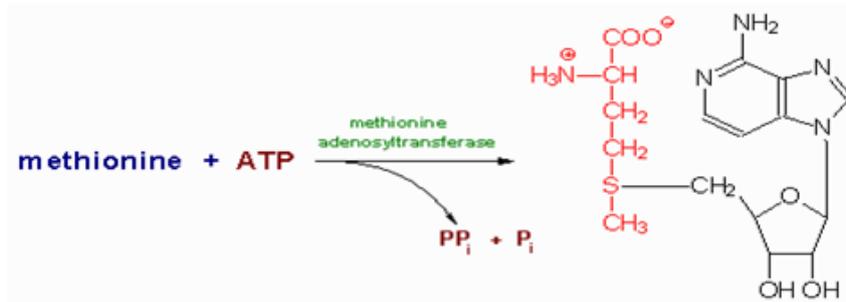




Gambar 3.15. Siklus Glukosa-Alani

#### 4. Katabolisme sistein

Sulfur untuk sintesis sistein berasal dari metionin. Kondensasi dari ATP dan metionin dikatalisis oleh enzim metionin adenosiltransferease menghasilkan S-adenosilmetionin (SAM).

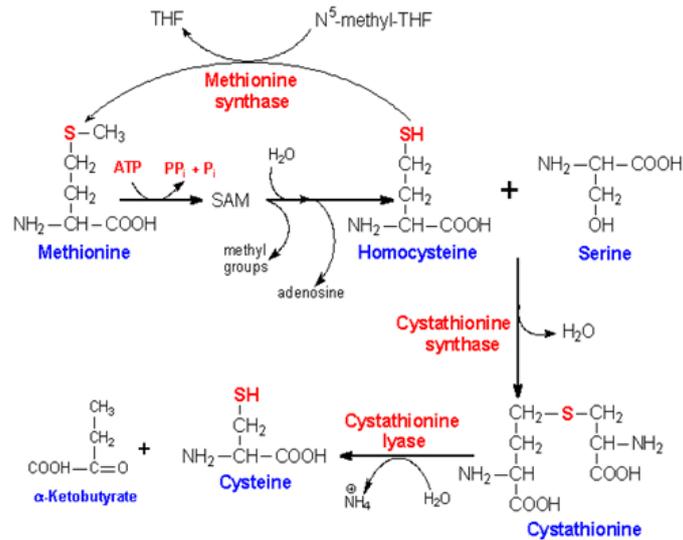


Gambar 3.16. Biosintesis S-adenosilmetionin (SAM)

SAM merupakan precursor untuk sejumlah reaksi transfer metil (misalnya konversi norepinefrin menjadi epinefrin). Akibat dari tranfer metil adalah perubahan SAM menjadi S-adenosilhomosistein. S-adenosilhomosistein selanjutnya berubah menjadi homosistein dan adenosin dengan bantuan enzim adenosilhomosisteinase. Homosistein dapat diubah kembali menjadi metionin oleh metionin sintase.

Reaksi transmetilasi melibatkan SAM sangatlah penting, tetapi dalam kasus ini peran S-adenosilmetionin dalam transmetilasi adalah sekunder untuk produksi homosistein (secara esensial oleh produk dari aktivitas transmetilase). Dalam produksi SAM, semua fosfat dari ATP hilang: 1 sebagai Pi dan 2 sebagai Ppi. Adenosin diubah menjadi metionin bukan AMP.

Dalam sintesis sistein, homosistein berkondensasi dengan serin menghasilkan sistationin dengan bantuan enzim sistationase. Selanjutnya dengan bantuan enzim sistationin liase sistationin diubah menjadi sistein dan  $\alpha$ -ketobutirat. Gabungan dari 2 reaksi terakhir ini dikenal sebagai transsulfurasi.

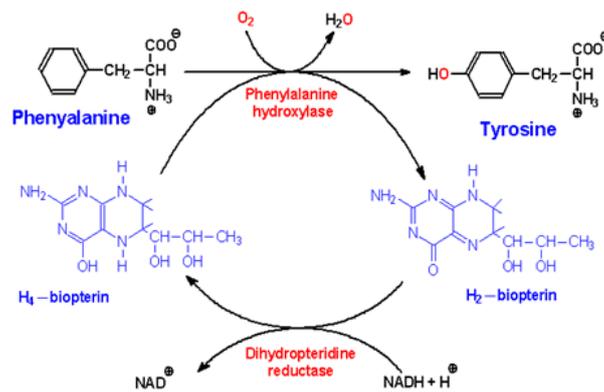


Gambar 3.17. Peran metionin dalam sintesis sistein

## 5. Katabolisme Tirosin

Tirosin diproduksi di dalam sel dengan hidroksilasi fenilalanin. Setengah dari fenilalanin dibutuhkan untuk memproduksi tirosin. Jika diet kita kaya tirosin, hal ini akan mengurangi kebutuhan fenilalanin sampai dengan 50%.

Fenilalanin hidroksilase adalah campuran fungsi oksigenase: 1 atom oksigen digabungkan ke air dan lainnya ke gugus hidroksil dari tirosin. Reduktan yang dihasilkan adalah tetrahidrofolat kofaktor tetrahidrobiopterin, yang dipertahankan dalam status tereduksi oleh NADH-dependent enzyme dihydropteridine reductase (DHPR).



Gambar 3.18. Biosintesis tirosin dari fenilalanin

## LATIHAN

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

- 1) Jelaskan apa yang dimaksud dengan Transaminasi dan Deaminasi !
- 2) Tuliskan reaksi secara keseluruhan dari siklus urea !
- 3) Tuliskan reaksi secara keseluruhan dari siklus urea yang telah disederhanakan!

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

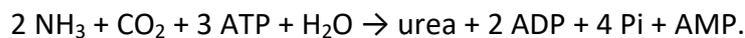
- 1) Transaminasi  
Transaminasi ialah proses katabolisme asam amino yang melibatkan pemindahan gugus amino dari satu asam amino kepada asam amino lain. Dalam reaksi transaminasi ini gugus asam amino dari suatu asam amino dipindahkan kepada salah satu dari tiga senyawa keto, yaitu asam piruvat,  $\alpha$  ketoglutarat atau oksaloasetat, sehingga senyawa keto ini diubah menjadi asam amino, sedangkan asam amino semula diubah menjadi asam keto.
- 2) Deaminasi  
Pada reaksi ini dapat dijumpai dua tipe atau sub jalur yaitu yang bersifat oksidatif dan lainnya non-oksidatif. Yang pertama masih dibedakan atas dasar koenzim yang membantu aktivitas enzim yaitu NAD<sup>+</sup> (atau NADP<sup>+</sup>) atau FAD (atau FMN).
  - Deaminasi oksidatif  
L-Glutamat yang berhasil mengumpulkan gugus amino pada reaksi transaminasi dapat melepaskannya melalui reaksi deaminasi oksidatif. Enzim yang mengkatalisis reaksi ini adalah L-glutamat dehidrogenase yang dibantu oleh NAD (atau NADP<sup>+</sup>). Reaksinya diduga berlangsung dalam dua tahap yaitu dehidrogenasi dan hidrolisis.
  - Deaminasi nonoksidatif  
Deaminasi nonoksidatif ialah perubahan L-serin menjadi asam piruvat yang dikatalisis oleh serin dehidratase, perubahan treonin menjadi  $\alpha$ -ketobutirat oleh treonin dehidratase dan lain-lain reaksi yang sejenis. Golongan enzim ini mengandung piridoksal-P sebagai gugus prostetisnya.
- 3) Reaksi keseluruhan dari siklus urea yang telah disederhanakan yaitu:
  - a)  $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{aspartat} + 3 \text{ATP} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + \text{fumarat} + 2 \text{ADP} + 2 \text{Pi} + \text{AMP} + \text{PPi}$  (pirofosfat)
  - b)  $2 \text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 3 \text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + 2 \text{ADP} + 4 \text{Pi} + \text{AMP}$

## RINGKASAN

Tahap awal reaksi 130nticodon130 asam amino, melibatkan pelepasan gugus amino, kemudian baru perubahan kerangka karbon pada molekul asam amino. Dua proses utama pelepasan gugus asam amino, yaitu 130nticodon130se dan deaminasi.

Siklus urea merupakan pelepasan gugus  $\text{NH}_4$  pada asam amino dalam bentuk amoniak melalui reaksi transaminase dan deaminasi, kemudian dikeluarkan dalam bentuk urea dari urine. Reaksi pertama adalah sintesis karbamoil fosfat. Reaksi kedua adalah sintesis sitrulin. Reaksi ketiga adalah sintesis argininosuksinat. Reaksi keempat adalah pembelahan argininosuksinat menjadi arginin dan fumarat, Reaksi kelima adalah pembelahan arginin menjadi ornitin dan urea.

Reaksi secara keseluruhan dari siklus urea adalah  $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 13\text{Oncodon} + 3 \text{ATP} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + \text{fumarat} + 2 \text{ADP} + 2 \text{Pi} + \text{AMP} + \text{Ppi}$  (pirofosfat). Karena fumarat diperoleh dari menghilangkan  $\text{NH}_3$  pada  $13\text{Oncodon}$  dan  $\text{PP I} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Pi}$  maka persamaan reaksi kimianya dapat disederhanakan menjadi



## TES 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Tahap awal reaksi  $13\text{Oncodon}$  asam amino, melibatkan pelepasan :
  - A. Gugus Karboksil
  - B. Gugus Ester
  - C. Gugus Amino
  - D. Gugus Hidroksil
  
- 2) Transaminasi adalah :
  - A. proses katabolisme asam amino yang melibatkan pemindahan gugus amino dari satu asam amino kepada asam amino lain.
  - B. proses katabolisme asam amino yang melibatkan pemindahan gugus amino dari satu atau lebih asam amino kepada asam amino lain.
  - C. proses  $13\text{Oncodon}$  asam amino yang melibatkan pemindahan dua gugus amino dari beberapa asam amino kepada asam amino lain.
  - D. proses  $13\text{Oncodon}$  asam amino yang melibatkan pemindahan lebih dari dua gugus amino dari satu asam amino kepada asam amino lain.
  
- 3) Deaminasi non oksidatif adalah :
  - A. perubahan L-serin menjadi asam piruvat yang di katalis oleh enzim lipase
  - B. perubahan L-serin menjadi asam piruvat yang di katalis oleh serin dehidratase
  - C. perubahan L-serin dan serotonin menjadi asam piruvat yang di katalis oleh serin dehidratase
  - D. perubahan L-serin menjadi asam piruvat yang di katalis oleh serin dehidratase dan enzim lipase

- 4) Reaksi secara keseluruhan dari siklus urea sebelum disederhanakan adalah :
- $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 131\text{nticodon} + 3 \text{ ATP} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + \text{fumarat} + 2 \text{ ADP} + 2 \text{ Pi} + \text{AMP} + \text{Ppi (pirofosfat)}$ .
  - $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 131\text{nticodon} + 3 \text{ ATP} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + \text{fumarat} + 3 \text{ ADP} + 2 \text{ Pi} + \text{AMP} + \text{Ppi (pirofosfat)}$ .
  - $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 132\text{nticodon} + 4 \text{ ATP} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + \text{fumarat} + 2 \text{ ADP} + 2 \text{ Pi} + \text{AMP} + \text{Ppi (pirofosfat)}$ .
  - $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + 132\text{nticodon} + 3 \text{ ATP} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{urea} + \text{fumarat} + 2 \text{ ADP} + 2 \text{ Pi} + \text{AMP} + \text{Ppi (pirofosfat)}$ .
- 5) Dalam sintesis sistein, homosistein berkondensasi dengan sering menghasilkan :
- ATP
  - Sistationin
  - Urea
  - Pirofosfat
- 6) Dalam reaksi argininosuksinat sintase, aspartat dan sitrulin diikat bersamaan melalui :
- Gugus amino 132nticodon dan Sistein
  - Gugus amino 132nticodon
  - Sistein
  - Gugus amino 132nticodon dan Sitrulin
- 7) Pembelahan hidrolitik gugus 132nticodon dari 132nticodon dikatalisis oleh :
- Enzim
  - Arginase
  - Sistein
  - Gugus Amino
- 8) L-Glutamat yang berhasil mengumpulkan gugus amino pada reaksi 132nticodon132se dapat melepaskannya melalui :
- Reaksi deaminasi oksidatif
  - Reaksi deaminasi non-oksidatif
  - Siklus Krebs
  - Siklus Urea
- 9) Bakteri usus mengubah urea menjadi :
- Asam Amino
  - ATP
  - Amonia
  - Energi

- 10) Reaksi siklus urea yang terjadi di mitokondria ada pada tahap :
- A. 1, 2 dan 3
  - B. 2, 3 dan 4
  - C. 1 dan 2
  - D. 4 dan 5

## Kunci Jawaban Tes

### TES 1

- 1) C  
Protein merupakan polimer dari asam amino, disebut juga polipeptida. Antar asam amino terdapat ikatan peptida, yaitu ikatan antara gugus karboksil suatu asam amino dengan gugus amino dari asam amino lain.
- 2) D
- 3) A  
Karena asam amino adalah polimer penyusun protein.
- 4) C  
Karena pembagian protein berdasarkan strukturnya dibagi menjadi 4 bagian yaitu Struktur Primer, Struktur Sekunder, Struktur Tersier dan Struktur Kuartener.
- 5) B
  - a) Albumin  
Larut air, mengendap dengan garam konsentrasi tinggi. Misalnya albumin telur dan albumin serum
  - b) Globulin Glutelin  
Tidak larut dalam larutan netral, larut asam dan basa encer. Glutenin (gandum), orizenin (padi).
  - c) Gliadin (prolamin)  
Larut etanol 70-80%, tidak larut air dan etanol 100%. Gliadin/gandum, zein/jagung
  - d) Histon  
Bersifat basa, cenderung berikatan dengan asam nukleat di dalam sel. Globin bereaksi dengan heme (senyawa asam menjadi hemoglobin). Tidak larut air, garam encer dan pekat (jenuh 30-50%). Misalnya globulin serum dan globulin telur.
- 6) D  
Protein sudah mengalami interaksi intermolekul, melalui rantai samping asam amino. Ikatan yang membentuk struktur ini, didominasi oleh ikatan hidrogen antar rantai samping yang membentuk pola tertentu bergantung pada orientasi ikatan hidrogennya. Ada dua jenis struktur sekunder, yaitu: **alpha-heliks** dan **beta-sheet**.
- 7) B

#### Sifat Asam Amino

Asam amino memiliki beberapa sifat sebagai berikut :

- a) Amfoter  
Gugus fungsional pada asam amino, yaitu karboksil dan amina, keduanya memengaruhi sifat keasaman asam amino. Dengan demikian, asam amino dapat

bereaksi dengan asam maupun basa sehingga dikatakan bersifat amfoter atau amfiprotik. Sifat amfoter ini tampak pada asam amino yang hanya mengikat satu gugus -COOH dan satu gugus -NH<sub>2</sub>. Adapun asam amino yang mengikat lebih dari satu gugus -COOH dan hanya satu gugus -NH<sub>2</sub>, akan lebih bersifat asam.

b) Ion Zwitter

Pada asam amino, ada gugus yang dapat melepaskan ion H<sup>+</sup> dan ada gugus yang dapat menerima ion H<sup>+</sup>. Akibatnya, terbentuk molekul yang memiliki dua jenis muatan, yaitu muatan positif dan muatan negatif. Molekul seperti ini, dikenal sebagai ion zwitter atau kadang-kadang disebut juga sebagai ion dipolar.

c) Optis Aktif

Semua asam amino kecuali glisin, memiliki atom C asimetris atau atom C kiral, yaitu atom C yang mengikat empat gugus yang berbeda (gugus -H, -COOH, -NH<sub>2</sub>, dan -R). Oleh karena itu, semua asam amino (kecuali glisin) bersifat optis aktif. Artinya, senyawa tersebut dapat memutar bidang polarisasi cahaya

8) D

Berdasarkan struktur kimia, asam amino digolongkan menjadi :

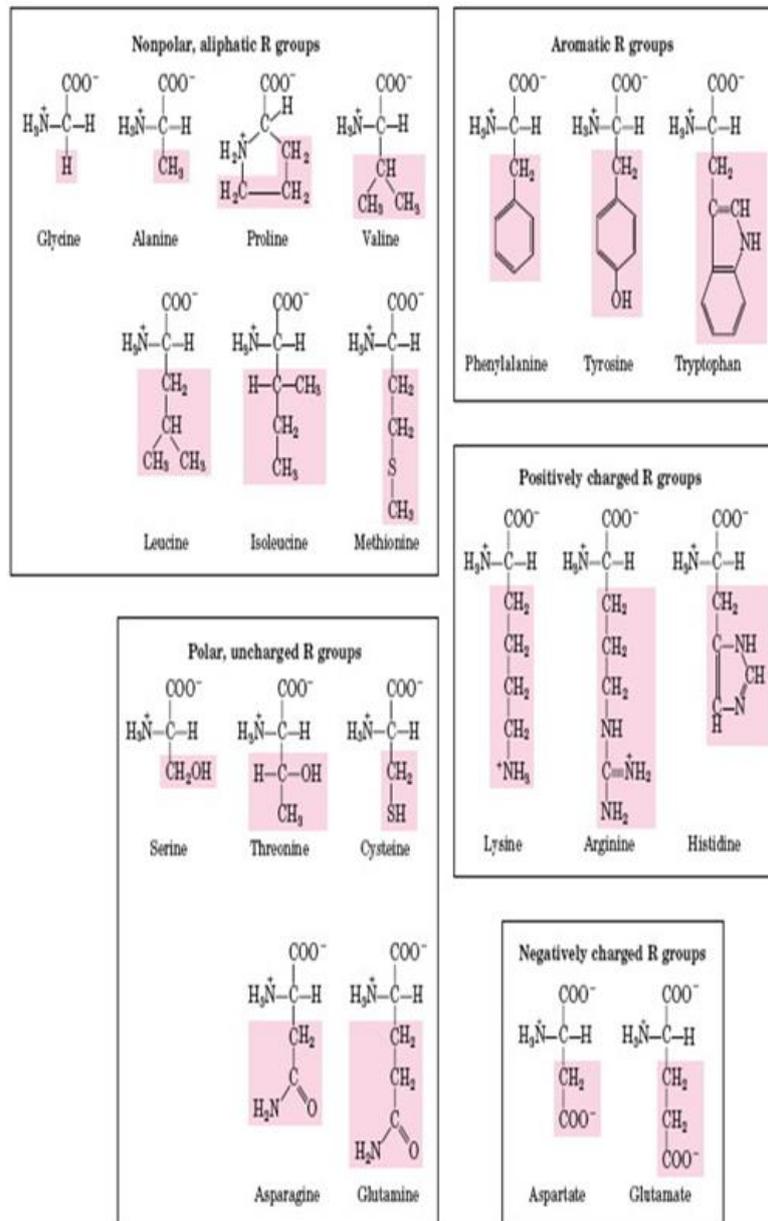
- a) Kelompok asam amino Monoamino-monokarboksilat : glisin, alanin, serin, treonin, valin, leusin, dan isoleusin.
- b) Kelompok asam amino yang mengandung sulfur : **metionin, sistin, dan sistein.**
- c) Kelompok asam amino monoamino-dikarboksilat : asam aspartat dan asam glutamat.
- d) Kelompok asam amino dasar : lisin, arginin, hidroksiprolin, dan histidin.
- e) Kelompok asam amino aromatik : fenilalanin dan treonin
- f) Kelompok asam amino heterosiklik : triptofan, prolin, dan hidroksiprolin.

9) B

Berdasarkan struktur kimia, asam amino digolongkan menjadi :

- a) Kelompok asam amino Monoamino-monokarboksilat : glisin, alanin, serin, treonin, valin, leusin, dan isoleusin.
- b) Kelompok asam amino yang mengandung sulfur : metionin, sistin, dan sistein.
- c) Kelompok asam amino monoamino-dikarboksilat : asam aspartat dan asam glutamat.
- d) Kelompok asam amino dasar : lisin, arginin, hidroksiprolin, dan histidin.
- e) Kelompok asam amino aromatik : fenilalanin dan treonin
- f) Kelompok asam amino heterosiklik : triptofan, prolin, dan hidroksiprolin.

10) A



Tes 2

1) C

Tahap awal reaksi 138spartate138 asam amino, melibatkan pelepasan gugus amino, kemudian baru perubahan kerangka karbon pada molekul asam amino. Dua proses utama pelepasan gugus asam amino, yaitu 138spartate138as dan deaminasi.

2) A

Transaminasi ialah proses katabolisme asam amino yang melibatkan pemindahan gugus amino dari satu asam amino kepada asam amino lain. Dalam reaksi 138spartate138as ini gugus asam amino dari suatu asam amino dipindahkan kepada

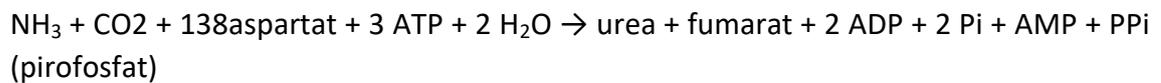
salah satu dari tiga senyawa keto, yaitu asam piruvat,  $\alpha$  ketoglutarat atau oksaloasetat, sehingga senyawa keto ini diubah menjadi asam amino, sedangkan asam amino semula diubah menjadi asam keto.

3) B

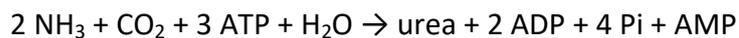
Deaminasi non-oksidatif ialah perubahan L-serin menjadi asam piruvat yang di katalis oleh serin dehidratase, perubahan treonin menjadi  $\alpha$ -ketobutirat oleh treonin dehidratase dan lain-lain reaksi yang sejenis. Golongan enzim ini mengandung piridoksal-P sebagai gugus prostetisnya

4) D

Reaksi secara keseluruhan dari siklus urea adalah :



Karena fumarat diperoleh dari menghilangkan  $\text{NH}_3$  pada aspartat (step 3 dan 4 pada tabel) dan  $\text{PPi} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Pi}$ , maka persamaan reaksi kimianya dapat disederhanakan menjadi :



5) B

Dalam sintesis sistein, homosistein berkondensasi dengan serin menghasilkan sistationin dengan bantuan enzim sistationase. Selanjutnya dengan bantuan enzim sistationin liase sistationin diubah menjadi sistein dan  $\alpha$ -ketobutirat. Gabungan dari 2 reaksi terakhir ini dikenal sebagai trans-sulfurasi.

6) B

Reaksi ketiga adalah sintesis argininosuksinat. Dalam reaksi argininosuksinat sintase, 139spartate dan sitrulin diikat bersamaan melalui gugus amino 139spartate. Reaksi membutuhkan ATP, dan keseimbangan cenderung kuat ke sintesis argininosuksinat.

7) B

Reaksi kelima adalah pembelahan 139spartat menjadi ornitin dan urea. Reaksi ini menyempurnakan siklus urea dan membentuk kembali (regenerasi ornitin), substrat untuk reaksi 2. Pembelahan hidrolitik gugus 139spartate dari 139spartat dikatalisis oleh arginase, yang terdapat dalam hati semua organisme 139spartate. Dalam jumlah yang lebih kecil, arginase juga terdapat dalam jaringan ginjal, otak, kelenjar mammae, jaringan testikuler dan kulit. Arginase hati mamalia diaktifkan oleh  $\text{Co}^{2+}$  atau  $\text{Mn}^{2+}$  Ornitin dan lisin merupakan penghambat kuat yang bersaing dengan arginin.

8) A

L-Glutamat yang berhasil mengumpulkan gugus amino pada reaksi 139spartate 139as dapat melepaskannya melalui reaksi deaminasi oksidatif. Enzim yang mengkatalisis

reaksi ini adalah L-glutamat 139spartate139ase yang dibantu oleh NAD (atau NADP+). Reaksinya diduga berlangsung dalam dua tahap yaitu dehidrogenasi dan hidrolisis.

9) C

Manusia mengekskresikan urea ke dalam usus dan air liur. Bakteri usus mengubah urea menjadi amonia. Amonia ini serta amonia yang dihasilkan oleh reaksi bakteri lain di dalam usus, diserap masuk ke dalam vena porta hepatica. Dalam keadaan normal, amonia ini diekstraksi oleh hati dan diubah menjadi urea.

10) C

Tahap 1 terjadi di Mitokondria

Tahap 2 terjadi di Mitokondria

Tahap 3 terjadi di Sitosol

Tahap 4 terjadi di Sitosol

Tahap 5 terjadi di Sitosol

## Daftar Pustaka

Bender, D.A. 1985. *Amino Acid Metabolism 2 nd ed*, Wiley,

Creighton, T.E. 1992. *Protein; Structure and Molecula Properties*. 2 nd edition, W.H. Freeman,

Yohanis, Ngili. 2013. *Biokimia Dasar*, Edisi Pertama. Bandung: Penerbit Rekayasa Sains.

David, Page. 1981. *Prinsip-prinsip Biokimia, edisi ke-2*. Jakarta: Penerbit Erlangga,

Ernawati, Sinaga. 2012. *Biokimia Dasar*, edisi ke-1.

## BAB IV LIPID

*Dra. Mimin Kusmiyati, M.Si.*

### PENDAHULUAN

Lipid merupakan kelompok senyawa yang penting bagi kelangsungan hidup. Tubuh manusia mengandung kurang lebih 15% lipid. Fungsinya sebagai sumber energi, cadangan energi dalam bentuk triasilgliserol, sebagai insulator yaitu penahan panas agar suhu tubuh dapat dipertahankan dalam kondisi normal. Fosfolipid dan kolesterol adalah senyawa-senyawa penting yang membentuk membran sel dan prekursor hormon-hormon seksual. Lipid juga ada yang berperan sebagai vitamin yaitu A,D,E,K. Vitamin-vitamin ini mempunyai struktur kimia yang berbeda satu sama lain, namun mempunyai satu kesamaan yaitu sukar larut di dalam air namun mudah larut dalam pelarut organik.

Lipid merupakan sumber energi dan memiliki sifat mudah larut dalam pelarut organik dan sukar larut dalam air. Materi yang akan dibahas dalam bab IV ini meliputi definisi, klasifikasi, struktur, asam lemak dan proses metabolisme lipid. Secara rinci, setelah Anda menyelesaikan proses pembelajaran tentang lipid ini, Anda diharapkan akan dapat:

1. Menyebutkan sumber dan klasifikasi lipid
2. Menjelaskan struktur lipid
3. Menjelaskan tentang asam lemak
4. Menjelaskan tentang proses beta oksidasi asam lemak
5. Menjelaskan tentang oksidasi asam lemak dengan atom C ganjil
6. Menjelaskan tentang ketogenesis
7. Menjelaskan tentang biosintesis asam lemak

Pemahaman Anda tentang kimia organik akan sangat membantu dalam mempelajari lipid ini. Selanjutnya, untuk membantu memperlancar pembelajaran mandiri Anda, materi pada bab IV ini dikemas dalam 2 (dua) topik, yaitu:

- Topik 1. Lemak
- Topik 2. Metabolisme Lemak

# Topik 1

## L e m a k

Lipid merupakan kelompok senyawa yang penting sebagai sumber cadangan energi utama bagi makhluk hidup, seperti triasilgliserol. Disamping itu juga berperan sebagai insulator yang berfungsi sebagai penahan panas agar suhu tubuh dapat dipertahankan dalam keadaan normal. Fosfolipid dan kolesterol, senyawa-senyawa penting yang membentuk membran sel dan prekursor hormon seksual. Lipid juga ada yang berperan sebagai vitamin yaitu vitamin-vitamin yang larut dalam lipid seperti A, D, E, K.

Lemak adalah kelompok senyawa heterogen yang berkaitan, baik secara aktual maupun potensial dengan asam lemak. Lipid mempunyai sifat umum yang relatif tidak larut dalam air dan larut dalam pelarut non polar seperti eter, kloroform, dan benzena. Dalam tubuh, lemak berfungsi sebagai sumber energi yang efisien secara langsung dan secara potensial bila disimpan dalam jaringan adiposa. Lemak berfungsi sebagai penyekat panas dalam jaringan subkutan dan sekeliling organ-organ tertentu, dan lipin nonpolar bekerja sebagai penyekat listrik yang memungkinkan perambatan cepat gelombang depolarisasi sepanjang syaraf bermialin.

Klasifikasi lemak terdiri dari : lemak sederhana, lemak campuran dan lemak turunan (*derived lipid*). Lemak sederhana adalah ester asam lemak dengan berbagai alkohol. Lemak sederhana terdiri dari lemak dan lilin. Lemak merupakan ester asam lemak dengan gliserol. Lemak dalam tingkat cairan dikenal sebagai minyak oli. Lilin (*waxes*) adalah ester asam lemak dengan alkohol monohidrat yang mempunyai berat molekul lebih besar.

Lipid campuran adalah ester asam lemak yang mengandung gugus tambahan selain alkohol dan asam lemak. Lipid campuran terdiri dari fosfolipid, glikolipid dan lipid campuran lain. Fosfolipid merupakan lipid yang mengandung residu asam fosfat sebagai tambahan asam lemak dan alkohol. Fosfolipid juga memiliki basa yang mengandung nitrogen dan pengganti (*substituen*) lain. Pada banyak fosfolipid, misalnya gliserofosfolipid, alkoholnya adalah gliserol, tetapi pada yang lain, misalnya sfingofosfolipid, alkoholnya adalah sfingosin. Glikolipid adalah campuran asam lemak dengan karbohidrat yang mengandung nitrogen tetapi tidak mengandung asam fosfat. Lipid campuran lain seperti sulfolipid dan aminolipid. Lipoprotein juga dapat ditempatkan dalam katagori ini.

Lemak turunan adalah zat yang diturunkan dari golongan-golongan diatas dengan hidrolisis. Ini termasuk asam lemak (jenuh dan tidak jenuh), gliserol, steroid, alkohol disamping gliserol dan sterol, aldehida lemak dan benda keton. Gliserida (*asil-gliserol*), kolesterol dan ester kolesterol dinamakan lipid netral karena tidak bermuatan.

### A. ASAM LEMAK

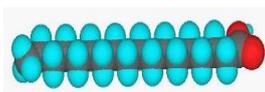
Fatty acid, istilah umum untuk menggambarkan asam lemak, konjugasi, dan turunannya adalah kelompok beragam molekul disintesis oleh rantai-perpanjangan dari



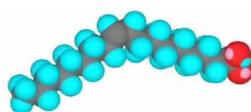
Tabel 4.1  
Asam-asam lemak penting bagi tubuh

Simbol numerik	Nama Umum	Struktur	Keterangan
14:0	Asam miristat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	Sering terikat dengan atom N terminal dari membran plasma bergabung dengan protein sitoplasmik
16:0	Asam palmitat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	Produk akhir dari sintesis asam lemak mamalia
16:1 <sup>D9</sup>	Asam palmitoleat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{C}=\text{C}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	
18:0	Asam stearat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	
18:1 <sup>D9</sup>	Asam oleat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{C}=\text{C}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	
18:2 <sup>D9,12</sup>	Asam linoleat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{C}=\text{CCH}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	<b>Asam lemak esensial</b>
18:3 <sup>D9,12,15</sup>	Asam linolenat	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}=\text{CCH}_2\text{C}=\text{CCH}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	<b>Asam lemak esensial</b>
20:4 <sup>D5,8,11,14</sup>	Assam arakhidonat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3(\text{CH}_2\text{C}=\text{C})_4(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	Prekursor untuk sintesis eikosanoid

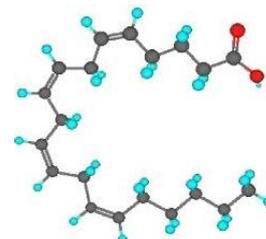
Asam stearat



Asam oleat



Asam arakhidonat



Gambar 4.2 Beberapa contoh struktur asam lemak

### 1. Klasifikasi Asam Lemak

Asam lemak adalah asam karboksilat yang diperoleh dari hidrolisis ester terutama gliserol dan kolesterol. Asam lemak yang terdapat di alam biasanya mengandung atom karbon genap (karena disintesis dari dua unit karbon) dan merupakan derivat berantai lurus. Rantai dapat jenuh (tidak mengandung ikatan rangkap) dan tidak jenuh (mengandung satu atau lebih ikatan rangkap).

Asam-asam lemak tidak jenuh mengandung lebih sedikit dari dua kali jumlah atom hidrogen sebagai atom karbon, serta satu atau lebih pasangan atom-atom karbon yang berdekatan dihubungkan oleh ikatan rangkap. Asam lemak tidak jenuh dapat dibagi menurut derajat ketidakterjenuhannya, yaitu asam lemak tak jenuh tunggal (monounsaturated, monoetenoid, monoenoat), asam lemak tak jenuh banyak (polyunsaturated, polietenoid, polienoat) yang terjadi apabila beberapa pasang dari atom karbon yang berdekatan mengandung ikatan rangkap dan eikosanoid. Eikosanoid adalah senyawa yang berasal dari asam lemak eikosapolienoat, yang mencakup prostanoid dan leukotrien (LT). Prostanoid termasuk prostaglandin (PG), prostasiklin (PGI) dan tromboxan (TX). Istilah prostaglandin sering digunakan Eikosanoid adalah senyawa yang berasal dari asam lemak eikosapolienoat, yang mencakup prostanoid dan leukotrien (LT). Prostanoid termasuk prostaglandin (PG), prostasiklin (PGI) dan tromboxan (TX). Istilah prostaglandin sering digunakan dengan longgar termasuk semua prostanoid. Contoh asal lemak tidak jenuh dapat dilihat pada tabell di bawah ini.

*Tabel 4.2  
Asam-asam lemak tidak jenuh*

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Palmitoleat (heksadesenoat)	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Oleat (oktadesenoat)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Linoleat (oktadekadienoat)	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Linolenat (oktadekatrienoat)	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Arakidonat (eikosatetrienoat)	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Klupanodonat (dokosapentaenoat)	C <sub>22</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	Cair

Asam lemak jenuh mempunyai atom hidrogen dua kali lebih banyak dari atom karbonnya, dan tiap molekulnya mengandung dua atom oksigen. Asam lemak jenuh mengandung semua atom hidrogen yang mungkin, dan atom karbon yang berdekatan dihubungkan oleh ikatan valensi tunggal. Asam lemak jenuh dapat dipandang berdasarkan asam asetat sebagai anggota pertama dari rangkaiannya. Anggota-anggota lebih tinggi lainnya dari rangkaian ini terdapat khususnya dalam lilin. Beberapa asam lemak berantai cabang juga telah diisolasi dari sumber tumbuh-tumbuhan dan binatang. Asam-asam lemak jenuh memiliki titik cair yang lebih tinggi dibandingkan dengan asam yang tidak jenuh, untuk

atom C yang sama banyaknya. Rantai asam lemak jenuh yang lebih panjang, titik cairnya lebih tinggi dibandingkan dengan yang rantainya lebih pendek. Contoh asam-asam lemak jenuh dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

*Tabel 4.3*  
*Asam-asam lemak jenuh*

<b>Asam-asam lemak</b>	<b>Formula</b>	<b>Titik cair (°C)</b>
Butirat (butanoat)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Kaproat (hexanoat)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	Cair
Kaprilat (oktanoat)	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	16
Kaprat (dekanoat)	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	31
Laurat (dodekanoat)	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	44
Miristat (ttradekanoat)	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	54
Palmitat (heksadekanoat)	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	63
Stearat (oktadekanoat)	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	70
Arakidat (eikosanoat)	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	76
Lignoserat (tatrakosanoat)	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub> O <sub>2</sub>	86

## 2. Transport Lemak ke Jaringan

Sebagian besar lemak dalam pakan adalah lemak netral (trigliserida), sedangkan selebihnya adalah fosfolipid dan kolesterol. Jika lemak masuk ke dalam duodenum, maka mukosa duodenum akan menghasilkan hormon enterogastron, atau penghambat peptida lambung, yang pada waktu sampai di lambung akan menghambat sekresi getah lambung dan memperlambat gerakan pengadukan. Hal ini tidak saja mencegah lambung untuk mencerna lapisannya sendiri, tetapi juga memungkinkan lemak untuk tinggal lebih lama dalam duodenum tempat zat tersebut dipecah oleh garam-garam empedu dan lipase.

Lemak yang diemulsikan oleh garam empedu dirombak oleh esterase yang memecah ikatan ester yang menghubungkan asam lemak dengan gliserol. Lipase, yang sebagian besar dihasilkan oleh pankreas, meskipun usus halus juga menghasilkan sedikit, merupakan esterase utama pada unggas. Garam-garam empedu mengemulsikan butir-butir lemak menjadi butir yang lebih kecil lagi, yang kemudian dipecah lagi oleh enzim lipase pankreatik menjadi digliserida, monogliserida, asam-asam lemak bebas (FFA = free fatty acid) dan gliserol. Garam-garam empedu kemudian merangsang timbulnya agregasi FFA, monogliserida dan kolesterol menjadi misal (micelle), yang masing-masing mengandung ratusan molekul. Campuran garam empedu, asam lemak dan lemak yang sebagian telah tercerna, mengemulsikan lemak lebih lanjut menjadi partikel-partikel yang sebagian besar cukup kecil untuk diserap secara langsung.

Cairan empedu adalah suatu cairan garam berwarna kuning kehijauan yang mengandung kolesterol, fosfolipid lesitin, serta pigmen empedu. Garam-garam empedu

(garam natrium dan kalium) dari asam glikolat dan taurokolat adalah unsur-unsur terpenting dari cairan empedu, karena unsur-unsur itulah yang berperan dalam pencernaan dan penyerapan lemak. Trigliserida di dalam chyme duodenum cenderung untuk menggumpal bersama-sama sebagai kelompok atau gugus asam lemak berantai panjang yang tidak larut dalam air. Empedu juga membantu dalam penyerapan vitamin yang larut dalam lemak, serta membantu kerja lipase pankreatik. Garam-garam empedu adalah garam-garam basa, oleh karena itu dapat membantu juga dalam menciptakan suasana yang lebih alkalis dalam chyme intestinal agar absorpsi berlangsung dengan lancar. Komponen kolesterol dari cairan empedu berasal dari pembentukan di dalam hati maupun dari bahan yang dikonsumsi. Kolesterol tidak larut dalam air, tetapi garam-garam empedu dan lesitin menyebabkannya menjadi bentuk yang mudah larut sehingga kolesterol itu dapat berada di dalam cairan empedu.

Sekresi garam-garam empedu dari hati tergantung pada konsentrasi garam empedu yang terdapat di dalam darah yang melewati hati. Dengan meningkatnya konsentrasi plasma dari garam-garam empedu yang terjadi selama pencernaan (karena garam-garam empedu diserap kembali dari usus halus ke vena porta hati menuju kembali ke hati), kemudian laju sekresi dari hati akan meningkat. Garam-garam empedu secara langsung merangsang sel-sel sekretoris. Sekresi larutan alkalis dari empedu tergantung pada sekresi gastrin dari daerah antral lambung, dan tergantung juga pada laju sekresi kolesistokinin dan sekretin dari sel-sel mukosa duodenal. Sementara sekresi tersebut beredar di dalam darah selama mencerna makanan, meningkatlah sekresi larutan empedu dari hati. Sekretin itu efektif sekali dalam meningkatkan sekresi.

Absorpsi lemak dan asam lemak merupakan masalah khusus, karena tidak seperti hasil akhir pencernaan, zat-zat ini tidak larut dalam air. Penyerapan zat ini dipermudah oleh kombinasi dengan garam empedu karena kombinasi ini merupakan suatu kompleks (misal/micelle) yang larut dalam air. Garam empedu itu kemudian dibebaskan dalam sel mukosa dan dipergunakan lagi, dan asam lemak serta gliserol bersenyawa dengan fosfat untuk membentuk fosfolipid. Fosfolipid ini kemudian distabilisasi dengan protein dan dilepaskan dalam sistem getah bening sebagai globul-globul kecil yang disebut kilomikron yang kemudian di bawa ke aliran darah.

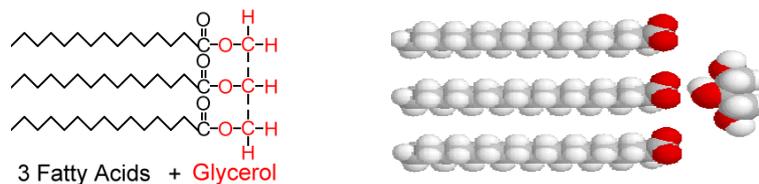
Ketika telah berada di dalam sel-sel epitel, terjadilah resintesis menjadi trigliserida, dan kemudian dilepaskan ke dalam limfatik lakteal melalui emiositosis (kebalikan dari pinositosis). Lakteal merupakan pembuluh limfa yang menyerupai kapiler yang terdapat di dalam villi intestinal. Trigliserida masuk ke dalam lakteal sebagai kilomikron yang juga mengandung sejumlah kecil fosfolipid, kolesterol dan protein. Ini dihantarkan dalam bentuk chyle menuju ke pembuluh limfa yang lebih besar. Akhirnya, diteruskan ke sisterna chyli yang terletak di antara dua kura dari diafragma. Dari sisterna chyli, chyle bergerak melalui duktus torasik ke vena kava kranial atau ke vena jugular dekat pintu menuju ke vena kava dan ke sirkulasi vena. Bukti-bukti yang didapat secara biokimia dan penggunaan mikroskop elektron menunjukkan bahwa butir-butir kecil yang mengalami emulsifikasi dapat diserap secara pinositotik oleh sel-sel epitel dari usus dan masuk ke dalam lakteal dalam bentuk yang

sama. Kira-kira 10 persen asam-asam lemak tidak mengalami rekonstitusi menjadi trigliserida di dalam sel-sel absorpsi epitel, tetapi sebaliknya bergerak langsung ke dalam darah portal bersama-sama dengan gliserol.

Dalam waktu dua atau tiga jam setelah absorpsi makanan berlemak, kilomikron lenyap dari dalam darah, beberapa diambil oleh sel hati, yang lain dicerna dalam aliran darah oleh lipoprotein lipase. Lipoprotein lipase dihasilkan dalam jumlah besar oleh depo lemak dalam tubuh dan diperkirakan bahwa sebagian besar dari lemak yang dihidrolisis secara cepat diabsorpsi dan disusun kembali oleh jaringan ini. Lemak yang ditimbun dalam hati atau jaringan adiposa senantiasa mengalami perombakan dan resintesis, meskipun jumlah keseluruhan yang disimpan hanya berubah sedikit selama jangka waktu yang lama.

### 3. Gliserida Netral (Lemak Netral)

Gliserida netral adalah ester antara asam lemak dengan gliserol. Fungsi dasar dari gliserida netral adalah sebagai simpanan energi (berupa lemak atau minyak). Setiap gliserol mungkin berikatan dengan 1, 2 atau 3 asam lemak yang tidak harus sama. Jika gliserol berikatan dengan 1 asam lemak disebut monogliserida, jika berikatan dengan 2 asam lemak disebut digliserida dan jika berikatan dengan 3 asam lemak dinamakan trigliserida. Trigliserida merupakan cadangan energi penting dari sumber lipid.



Gambar 4.3 Struktur Trigliserida Sebagai Lemak Netral

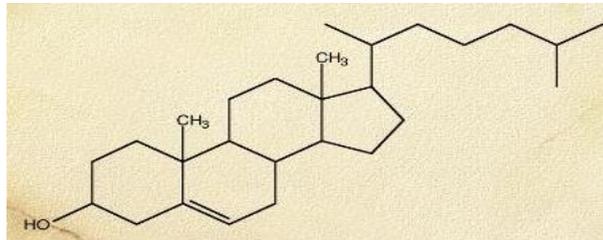
Adapun perbedaan sifat secara umum dari keduanya adalah:

- a. *Lemak*
  - Umumnya diperoleh dari hewan
  - Berwujud padat pada suhu ruang
  - Tersusun dari asam lemak jenuh
- b. *Minyak*
  - Umumnya diperoleh dari tumbuhan
  - Berwujud cair pada suhu ruang
  - Tersusun dari asam lemak tak jenuh

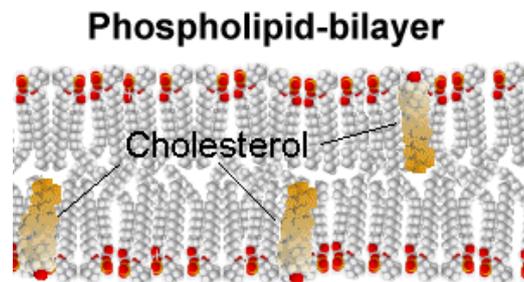
## B. KOLESTEROL

Selain fosfolipid, kolesterol merupakan jenis lipid yang menyusun membran plasma. Kolesterol juga menjadi bagian dari beberapa hormon.

Kolesterol berhubungan dengan pengerasan arteri. Dalam hal ini timbul plaque pada dinding arteri, yang mengakibatkan peningkatan tekanan darah karena arteri menyempit, penurunan kemampuan untuk meregang. Pembentukan gumpalan dapat menyebabkan infark miokard dan stroke.



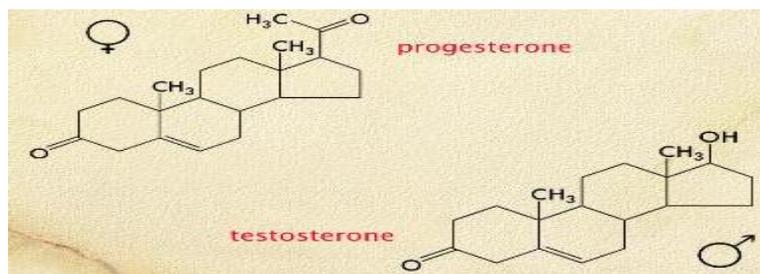
Gambar 4.4. Struktur dasar dari kolesterol



Gambar 4.5. Kolesterol merupakan bagian dari membran sel

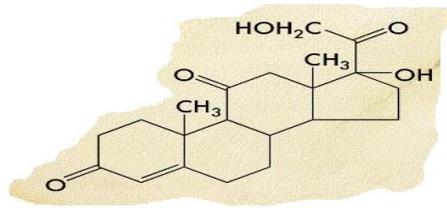
### C. STEROID

Beberapa hormon reproduktif merupakan steroid, misalnya testosteron dan progesteron.



Gambar 4.6. Progesteron dan testosteron

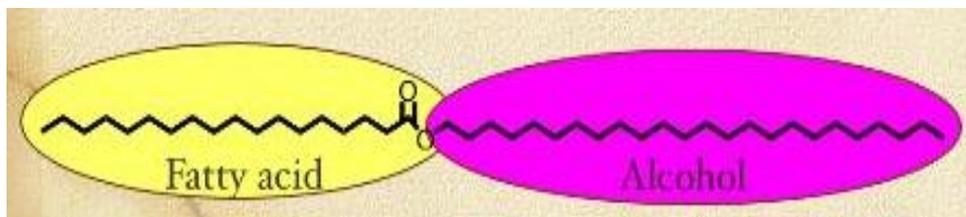
Steroid lainnya adalah kortison. Hormon ini berhubungan dengan proses metabolisme karbohidrat, penanganan penyakit arthritis rematoid, asthma, gangguan pencernaan dan sebagainya.



Gambar 4.7. Kortison

### 1. Malam/Lilin (Waxes)

Malam tidak larut di dalam air dan sulit dihidrolisis. Malam sering digunakan sebagai lapisan pelindung untuk kulit, rambut dan lain-lain. Malam merupakan ester antara asam lemak dengan alkohol rantai panjang.



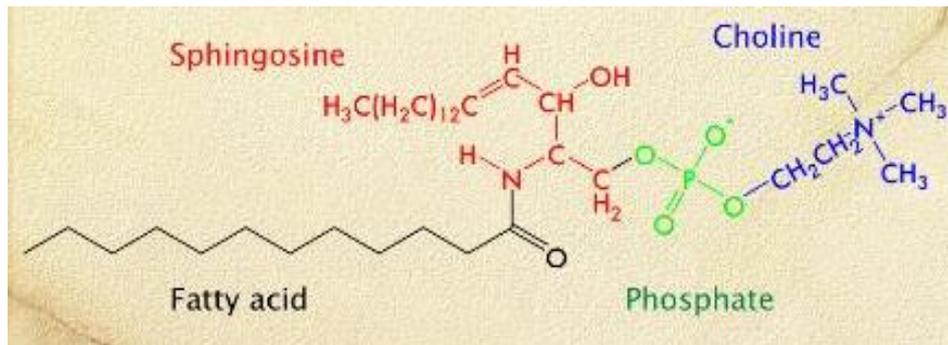
Gambar 4.8 Ester antara asam lemak dengan alkohol membentuk malam

### 2. Triasilgliserol

Triasilgliserol merupakan cadangan energi yang sangat besar karena dalam bentuk tereduksi dan bentuk anhidrat. Oksidasi sempurna asam lemak menghasilkan energi sebesar 9 kkal/g dibandingkan karbohidrat dan protein yang menghasilkan energi sebesar 4 kkal/g. Ini disebabkan karena asam lemak jauh lebih tereduksi. Lagi pula triasilgliserol sangat non polar sehingga tersimpan dalam keadaan anhidrat, sedangkan protein dan karbohidrat jauh lebih polar, sehingga bersifat terhidratasi. Satu gram glikogen kering akan mengikat sekitar dua gram air maka satu gram lemak anhidrat menyimpan energi enam kali lebih banyak dari pada energi yang dapat disimpan oleh satu gram glikogen yang terhidratasi. Ini menyebabkan bahwa triasilgliserol dijadikan simpanan energi yang lebih utama dibanding glikogen. Sel adipose dikhususkan untuk sintesis dan penyimpanan triasilgliserol serta untuk mobilisasi triasilgliserol menjadi molekul bahan bakar yang akan dipindahkan ke jaringan lain oleh darah.

### 3. Sphingolipid

Sphingolipids adalah keluarga senyawa kompleks yang berbagi fitur struktural umum, tulang punggung dasar sphingoid yang disintesis dari asam amino serin dan lemak rantai panjang asil KoA, kemudian diubah menjadi ceramides, phosphosphingolipids, glycosphingolipids dan senyawa lainnya. Asam lemak jenuh biasanya dengan panjang rantai 16-26 karbon phosphosphingolipids utama atom.



Gambar 4.9. Struktur kimia sfingomielin (perhatikan 4 komponen penyusunnya)

#### 4. Glycerolipids (trigliserida)

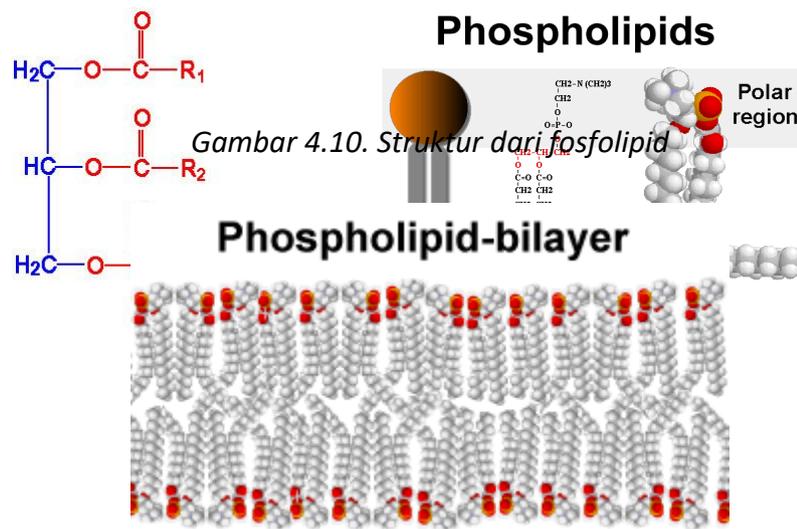
Glycerolipids terdiri terutama dari mono-, di- dan tri-glycerols diganti, yang paling terkenal menjadi ester asam lemak gliserol (trigliserida), juga dikenal sebagai trigliserida. Triasilgliserida adalah komponen utama dari lemak penyimpanan pada sel tumbuhan dan hewan, tetapi umumnya tidak dijumpai dalam membran. Triasilgliserida adalah molekul hidrofobik non polar bersifat tidak larut dalam air, tetapi mudah larut dalam pelarut non polar seperti kloroform, benzena atau eter, yang sering dipergunakan untuk ekstraksi lemak dari jaringan. Triasilgliserida akan terhidrolisis jika dididihkan dengan asam atau basa. Triasilgliserida terutama berfungsi sebagai lemak penyimpanan.

Subclass tambahan glycerolipids yang diwakili oleh glycosylglycerols, yang dicirikan oleh adanya satu atau lebih residu gula melekat pada gliserol melalui linkage glikosidik. Contoh struktur dalam kategori ini adalah digalactosyldiacylglycerols ditemukan di membran tanaman.

#### 5. Glycerophospholipids (Fosfolipid)

Glycerophospholipids, juga disebut sebagai fosfolipid, yang mana-mana di alam dan merupakan komponen kunci dari lapisan ganda lipid sel, serta terlibat dalam metabolisme. Selain lipid yang berada dalam keadaan bebas, ada juga lipid membran. Lipid membran yang paling banyak adalah fosfolipid. Fosfolipid merupakan lipid yang berikatan dengan fosfat anorganik. Fosfolipid berfungsi terutama sebagai unsur struktural membran. Beberapa lipida juga berikatan dengan protein spesifik membentuk lipoprotein, sedangkan yang berikatan dengan karbohidrat disebut glikolipid.

Contoh fosfolipid ditemukan di membran biologis adalah fosfatidilkolin (juga dikenal sebagai PC, GPCho atau lesitin), phosphatidylethanolamine (PE atau GPEtn) dan phosphatidylserine (PS atau GPSer).



*Gambar 4.11 Fosfolipid bilayer (lapisan ganda) sebagai penyusun membran sel*

## 6. Sterol lipid

Lipid bersifat dapat disabunkan dan tidak tersabunkan. Salah satu kelas utama lipid yang tidak tersabunkan adalah steroid. Steroid merupakan komponen penting membran. Steroid adalah molekul kompleks yang larut didalam lemak dengan 4 cincin yang saling bergabung. Steroid yang paling banyak adalah sterol, yang merupakan steroid alkohol. Kolesterol adalah sterol utama pada jaringan hewan. Molekul kolesterol mempunyai gugus polar pada bagian kepalanya, yaitu gugus hidroksil pada posisi 3. Bagian molekul yang lain merupakan struktur non polar yang relatif kaku. Sterol lemak, seperti kolesterol dan turunannya, adalah komponen penting dari membran lipid, bersama dengan glycerophospholipids dan sphingomyelins. Contoh lain dari sterol adalah pitosterol, seperti  $\beta$ -sitosterol, stigmasterol, dan brassicasterol, senyawa yang terakhir ini juga digunakan sebagai biomarker untuk pertumbuhan alga. Sterol dominan dalam membran sel jamur adalah ergosterol.

## 7. Prenol lipid

Lipid Prenol disintesis dari prekursor 5-karbon difosfat difosfat dan dimethylallyl isopentenil yang dihasilkan terutama melalui asam mevalonic (MVA) jalur. Isoprenoidnya sederhana (alkohol linier, diphosphates, dll) yang dibentuk oleh penambahan unit C5 berturut-turut, dan diklasifikasikan menurut jumlah unit-unit terpene. Struktur yang mengandung lebih dari 40 karbon dikenal sebagai politerpena.

## 8. Saccharolipids

Saccharolipids menggambarkan senyawa asam lemak yang dihubungkan langsung ke tulang belakang gula, membentuk struktur yang kompatibel membran. Dalam saccharolipids, pengganti monosakarida untuk hadir backbone gliserol di trigliserida dan fosfolipid.

## 9. Poliketida

Poliketida disintesis dengan polimerisasi subunit asetil dan propionil oleh enzim klasik serta enzim interatif dan multimodular. Mereka terdiri dari sejumlah besar metabolit sekunder dan produk-produk alami dari hewan, tumbuhan, sumber bakteri, jamur dan kelautan, dan memiliki keragaman struktur yang besar. Banyak poliketida molekul siklik yang sering lebih lanjut dimodifikasi oleh glikosilasi, metilasi, hidroksilasi, oksidasi, dan / atau proses lainnya. Banyak umumnya agen anti-mikroba, anti-parasit, dan anti-kanker yang digunakan adalah poliketida atau turunan poliketida, seperti erythromycins, tetrasiklin, avermectins, dan epothilones antitumor.

## LATIHAN

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

- 1) Sebutkan masing – masing 5 contoh dari asam lemak jenuh dan asam lemak tidak jenuh !
- 2) Sebutkan perbedaan sifat secara umum dari lemak dan minyak !
- 3) Apa yang kamu ketahui tentang Triasilgliserol !

*Petunjuk Jawaban Latihan*

### 1) ASAM LEMAK TIDAK JENUH

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Palmitoleat (heksadesenoat)	$C_{16}H_{30}O_2$	Cair
Oleat (oktadesenoat)	$C_{18}H_{34}O_2$	Cair
Linoleat (oktadekadienoat)	$C_{18}H_{32}O_2$	Cair
Linolenat (oktadekatrienoat)	$C_{18}H_{30}O_2$	Cair
Arakidonat (eikosatetrienoat)	$C_{20}H_{32}O_2$	Cair
Klupanodonat (dokosapentaenoat)	$C_{22}H_{34}O_2$	Cair

### ASAM LEMAK JENUH

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Butirat (butanoat)	$C_4H_8O_2$	Cair
Kaproat (hexanoat)	$C_6H_{12}O_2$	Cair
Kaprilat (oktanoat)	$C_8H_{16}O_2$	16
Kaprat (dekanoat)	$C_{10}H_{20}O_2$	31
Laurat (dodekanoat)	$C_{12}H_{24}O_2$	44
Miristat (ttradekanoat)	$C_{14}H_{28}O_2$	54
Palmitat (heksadekanoat)	$C_{16}H_{32}O_2$	63
Stearat (oktadekanoat)	$C_{18}H_{36}O_2$	70

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Arakidat (eikosanoat)	$C_{20}H_{40}O_2$	76
Lignoserat (tetrakosanoat)	$C_{24}H_{48}O_2$	86

2) Lemak

- Umumnya diperoleh dari hewan
- Berwujud padat pada suhu ruang
- Tersusun dari asam lemak jenuh

Minyak

- Umumnya diperoleh dari tumbuhan
- Berwujud cair pada suhu ruang
- Tersusun dari asam lemak tak jenuh

- 3) Triasilgliserol merupakan cadangan energi yang sangat besar karena dalam bentuk tereduksi dan bentuk anhidrat. Oksidasi sempurna asam lemak menghasilkan energi sebesar 9 kkal/g dibandingkan karbohidrat dan protein yang menghasilkan energi sebesar 4 kkal/g. Ini disebabkan karena asam lemak jauh lebih tereduksi. Lagi pula triasilgliserol sangat non polar sehingga tersimpan dalam keadaan anhidrat, sedangkan protein dan karbohidrat jauh lebih polar, sehingga bersifat terhidrasi

## RINGKASAN

Lemak adalah kelompok senyawa heterogen yang berkaitan, baik secara aktual maupun potensial dengan asam lemak. Lipid mempunyai sifat umum yang relatif tidak larut dalam air dan larut dalam pelarut non polar seperti eter, kloroform dan benzena. Dalam tubuh, lemak berfungsi sebagai sumber energi yang efisien secara langsung dan secara potensial bila disimpan dalam jaringan adiposa.

Fatty acid, istilah umum untuk menggambarkan asam lemak, konjugasi dan turunannya, adalah kelompok beragam molekul disintesis oleh rantai-perpanjangan dari primer asetil-KoA dengan malonyl-KoA atau kelompok methylmalonyl-KoA dalam proses yang disebut sintesis asam lemak. Kolesterol berhubungan dengan pengerasan arteri. Dalam hal ini timbul plaque pada dinding arteri, yang mengakibatkan peningkatan tekanan darah karena arteri menyempit, penurunan kemampuan untuk meregang. Pembentukan gumpalan dapat menyebabkan infark miokard dan stroke.

## TES 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Klasifikasi lemak terdiri dari :
  - A. lemak sederhana, lemak campuran dan lemak turunan
  - B. lemak jenuh dan lemak tidak jenuh
  - C. lemak primer, lemak sekunder dan lemak tersier
  - D. lemak nabati dan lemak hewani
  
- 2) Wax atau lilin termasuk ke dalam golongan lemak :
  - A. Lemak sekunder
  - B. Lemak Primer
  - C. Lemak turunan
  - D. Lemak sederhana
  
- 3) Asam lemak ini memiliki satu atau lebih ikatan rangkap, adalah :
  - A. Asam lemak jenuh
  - B. Asam lemak tidak jenuh
  - C. Palmitat
  - D. Stearat
  
- 4) Dibawah ini adalah asam lemak tidak jenuh :
  - A. Palmitat
  - B. Oleat
  - C. Stearat
  - D. Butirat
  
- 5) Dibawah ini adalah asam lemak jenuh :
  - A. Palmitat, Stearat, Linoleat dan Butirat
  - B. Oleat, Stearat, Linoleat dan Butirat
  - C. Palmitat, Stearat, Laurat dan Butirat
  - D. Laurat, Stearat, Oleat dan Linoleat
  
- 6) Sifat umum dari lemak, kecuali :
  - A. umumnya diperoleh dari hewan
  - B. berwujud padat pada suhu ruang
  - C. berwujud cair pada suhu ruang
  - D. tersusun dari asam lemak jenuh

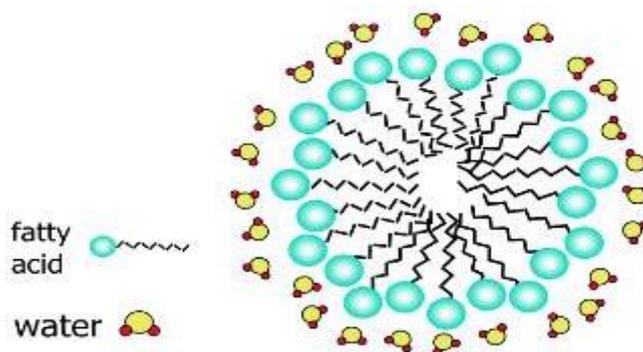
- 7) Lipid bersifat dapat disabunkan dan tidak tersabunkan. Salah satu kelas utama lipid yang tidak tersabunkan adalah :
- A. Steroid
  - B. Terpenoid
  - C. Saponin
  - D. Gliserol
- 8) Lemak yang diemulsikan oleh garam empedu dirombak oleh esterase yang memecah ikatan ester yang menghubungkan :
- A. asam lemak dengan steroid.
  - B. steroid dengan gliserol.
  - C. asam lemak dengan gliserol.
  - D. asam lemak dengan poliketida.
- 9) Fungsi dasar dari gliserida netral adalah sebagai:
- A. pemecah asam lemak
  - B. simpanan energi
  - C. energi utama
  - D. penghubung antara asam lemak dan gliserol
- 10)  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$  adalah struktur dari :
- A. Asam Palmitat
  - B. Oleat
  - C. Linoleat
  - D. Stearat

## Topik 2 Metabolisme Lemak

Lipid memegang peranan penting dalam penyediaan energi yang dibutuhkan oleh manusia dan hewan tingkat tinggi. Diantara senyawa lipid yang paling banyak berperan dalam penyediaan energi adalah triasilgliserol/trigliserida. Disamping itu triasilgliserol disimpan dalam tubuh sebagai cadangan energi dalam jumlah yang cukup besar di jaringan adiposa.

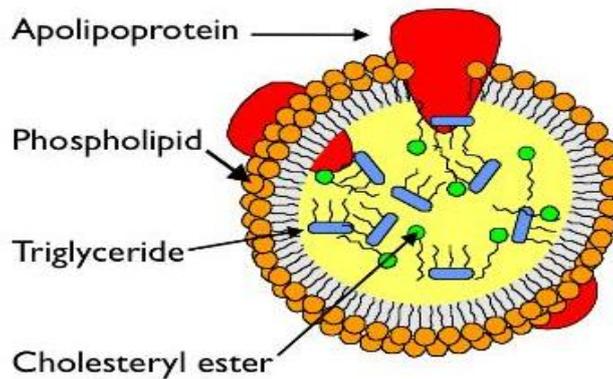
Beberapa organ dan jaringan memerlukan lipid sebagai sumber energi utamanya, misal jantung, hati dan otot rangka dalam keadaan istirahat. Karena terbatasnya jumlah glikogen yang dapat disimpan, kelebihan karbohidrat juga akan diubah menjadi triasilgliserol untuk disimpan sebagai cadangan energi.

Lipid yang kita peroleh sebagai sumber energi utamanya adalah dari lipid netral, yaitu trigliserid (ester antara gliserol dengan 3 asam lemak). Secara ringkas, hasil dari pencernaan lipid adalah asam lemak dan gliserol, selain itu ada juga yang masih berupa monogliserid. Karena larut dalam air, gliserol masuk sirkulasi portal (vena porta) menuju hati. Asam-asam lemak rantai pendek juga dapat melalui jalur ini.

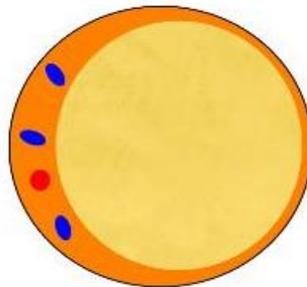


*Gambar 4.12 Struktur miselus. Bagian polar berada di sisi luar, sedangkan bagian non polar berada di sisi dalam*

Sebagian besar asam lemak dan monogliserida karena tidak larut dalam air, maka diangkut oleh miselus (dalam bentuk besar disebut emulsi) dan dilepaskan ke dalam sel epitel usus (enterosit). Di dalam sel ini asam lemak dan monogliserida segera dibentuk menjadi trigliserida (lipid) dan berkumpul berbentuk gelembung yang disebut kilomikron. Selanjutnya kilomikron ditransportasikan melalui pembuluh limfe dan bermuara pada vena kava, sehingga bersatu dengan sirkulasi darah. Kilomikron ini kemudian ditransportasikan menuju hati dan jaringan adiposa.



Gambar 4.13 Struktur kilomikron  
Perhatikan fungsi kilomikron sebagai pengangkut trigliserida



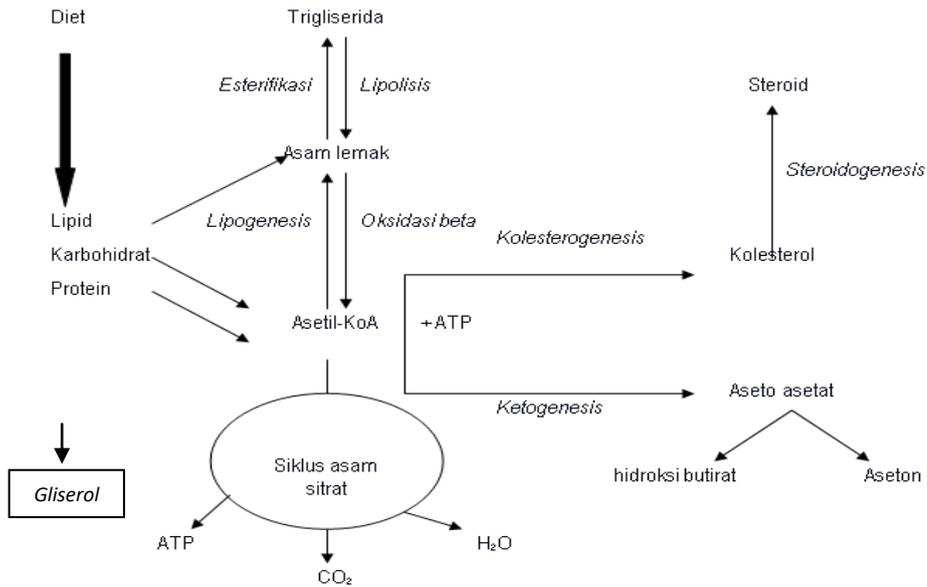
Gambar 4.14. Simpanan trigliserida pada sitoplasma sel jaringan adiposa

Didalam sel-sel hati dan jaringan adiposa, kilomikron segera dipecah menjadi asam-asam lemak dan gliserol. Selanjutnya asam-asam lemak dan gliserol tersebut, dibentuk kembali menjadi simpanan trigliserida. Proses pembentukan trigliserida ini dinamakan esterifikasi. Sewaktu-waktu jika kita membutuhkan energi dari lipid, trigliserida dipecah menjadi asam lemak dan gliserol, untuk ditransportasikan menuju sel-sel untuk dioksidasi menjadi energi. Proses pemecahan lemak jaringan ini dinamakan lipolisis. Asam lemak tersebut ditransportasikan oleh albumin ke jaringan yang memerlukan dan disebut sebagai asam lemak bebas (*free fatty acid/FFA*).

Secara ringkas, hasil akhir dari pemecahan lipid dari makanan adalah asam lemak dan gliserol. Jika sumber energi dari karbohidrat telah mencukupi, maka asam lemak mengalami esterifikasi yaitu membentuk ester dengan gliserol menjadi trigliserida sebagai cadangan energi jangka panjang. Jika sewaktu-waktu tak tersedia sumber energi dari karbohidrat barulah asam lemak dioksidasi, baik asam lemak dari diet maupun jika harus memecah cadangan trigliserida jaringan. Proses pemecahan trigliserida ini dinamakan lipolisis.

Proses oksidasi asam lemak dinamakan oksidasi beta dan menghasilkan asetil KoA. Selanjutnya sebagaimana asetil KoA dari hasil metabolisme karbohidrat dan protein, asetil KoA dari jalur inipun akan masuk ke dalam siklus asam sitrat sehingga dihasilkan energi. Di sisi lain, jika kebutuhan energi sudah mencukupi, asetil KoA dapat mengalami lipogenesis menjadi asam lemak dan selanjutnya dapat disimpan sebagai trigliserida.

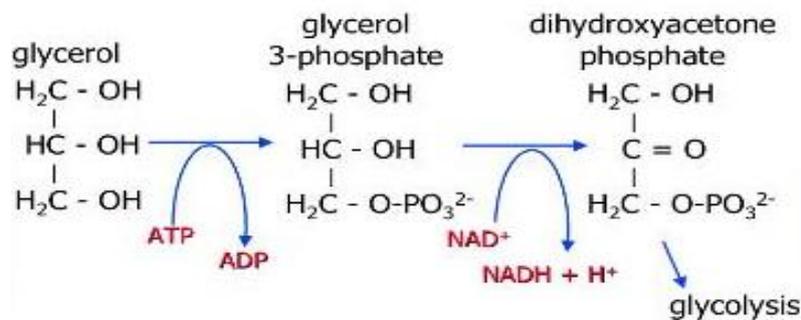
Beberapa lipid non gliserida disintesis dari asetil KoA. Asetil KoA mengalami kolesterologenesis menjadi kolesterol. Selanjutnya kolesterol mengalami steroidogenesis membentuk steroid. Asetil KoA sebagai hasil oksidasi asam lemak juga berpotensi menghasilkan badan-badan keton (aseto asetat, hidroksi butirrat dan aseton). Proses ini dinamakan ketogenesis. Badan-badan keton dapat menyebabkan gangguan keseimbangan asam-basa yang dinamakan asidosis metabolik. Keadaan ini dapat menyebabkan kematian.



Gambar 4.15. Ikhtisar metabolisme lipid

## A. METABOLISME GLISEROL

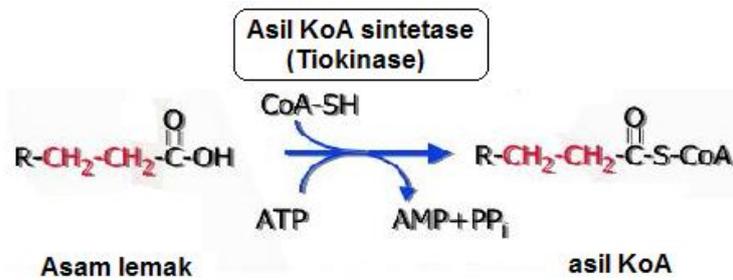
Gliserol sebagai hasil hidrolisis lipid (trigliserida) dapat menjadi sumber energi. Gliserol ini selanjutnya masuk ke dalam jalur metabolisme karbohidrat yaitu glikolisis. Pada tahap awal, gliserol mendapatkan 1 gugus fosfat dari ATP membentuk gliserol 3-fosfat. Selanjutnya senyawa ini masuk ke dalam rantai respirasi membentuk dihidroksi aseton fosfat, suatu produk antara dalam jalur glikolisis.



Gambar 4.16. Reaksi-reaksi kimia dalam metabolisme gliserol

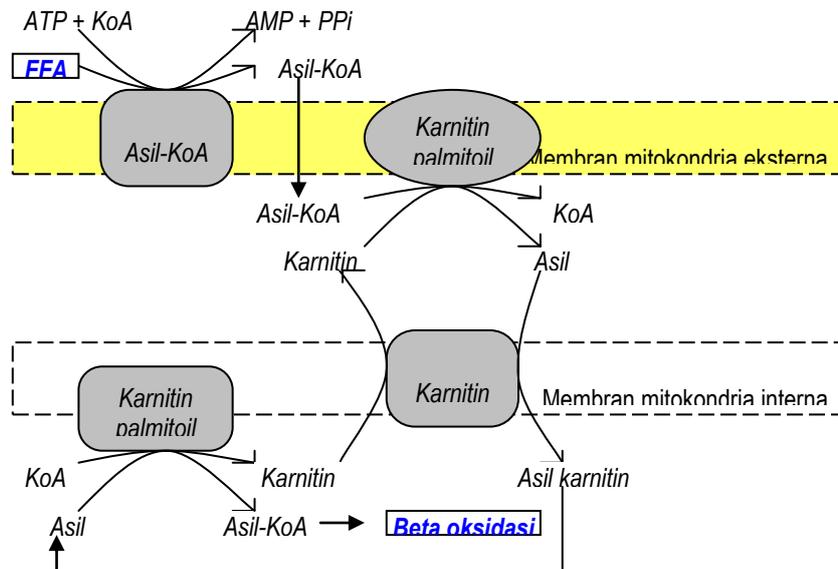
**1. Oksidasi asam lemak (oksidasi beta)**

Untuk memperoleh energi, asam lemak dapat dioksidasi dalam proses yang dinamakan oksidasi beta. Sebelum dikatabolisir dalam oksidasi beta, asam lemak harus diaktifkan terlebih dahulu menjadi asil-KoA. Dengan adanya ATP dan Koenzim A, asam lemak diaktifkan dengan dikatalisir oleh enzim asil-KoA sintetase (Tiokinase).



Gambar 4.17. Aktivasi asam lemak menjadi asil KoA

Asam lemak bebas pada umumnya berupa asam-asam lemak rantai panjang. Asam lemak rantai panjang ini akan dapat masuk ke dalam mitokondria dengan bantuan senyawa karnitin, dengan rumus  $(CH_3)_3N^+-CH_2-CH(OH)-CH_2-COO^-$ .



Gambar 4.18 Mekanisme transportasi asam lemak trans membran mitokondria melalui mekanisme pengangkutan karnitin

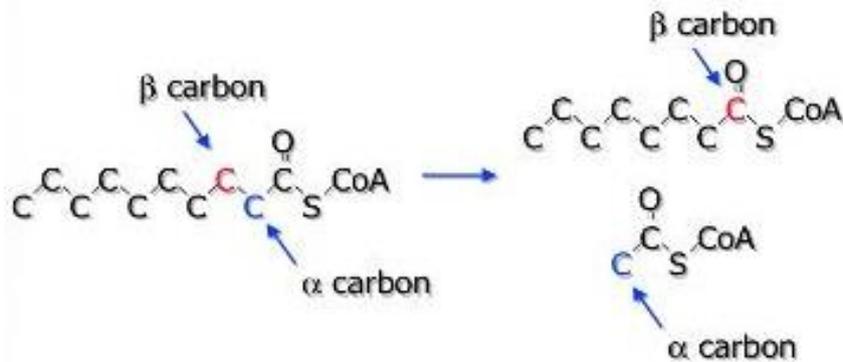
Langkah-langkah masuknya asil KoA ke dalam mitokondria dijelaskan sebagai berikut:

- Asam lemak bebas (FFA) diaktifkan menjadi asil-KoA dengan dikatalisir oleh enzim tiokinase.
- Setelah menjadi bentuk aktif, asil-KoA dikonversikan oleh enzim karnitin palmitoil transferase I yang terdapat pada membran eksterna mitokondria menjadi asil karnitin.

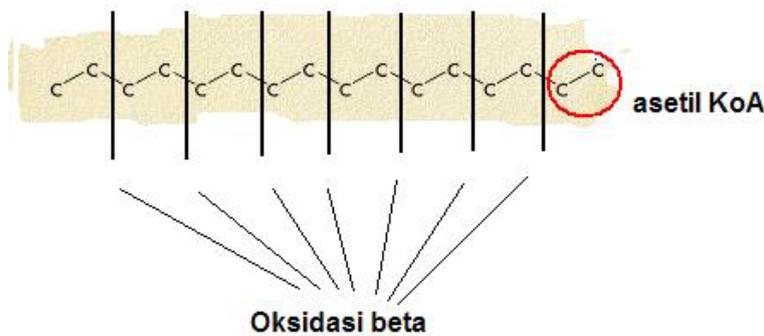
Setelah menjadi asil karnitin, barulah senyawa tersebut bisa menembus membran interna mitokondria.

- Pada membran interna mitokondria terdapat enzim karnitin asil karnitin translokase yang bertindak sebagai pengangkut asil karnitin ke dalam dan karnitin keluar.
- Asil karnitin yang masuk ke dalam mitokondria selanjutnya bereaksi dengan KoA dengan dikatalisir oleh enzim karnitin palmitoiltransferase II yang ada di membran interna mitokondria menjadi Asil Koa dan karnitin dibebaskan.
- Asil KoA yang sudah berada dalam mitokondria ini selanjutnya masuk dalam proses oksidasi beta.

Dalam oksidasi beta, asam lemak masuk ke dalam rangkaian siklus dengan 5 tahapan proses dan pada setiap proses, diangkat 2 atom C dengan hasil akhir berupa asetil KoA. Selanjutnya asetil KoA masuk ke dalam siklus asam sitrat. Dalam proses oksidasi ini, karbon β asam lemak dioksidasi menjadi keton.



Gambar 4.19 Oksidasi karbon β menjadi keton

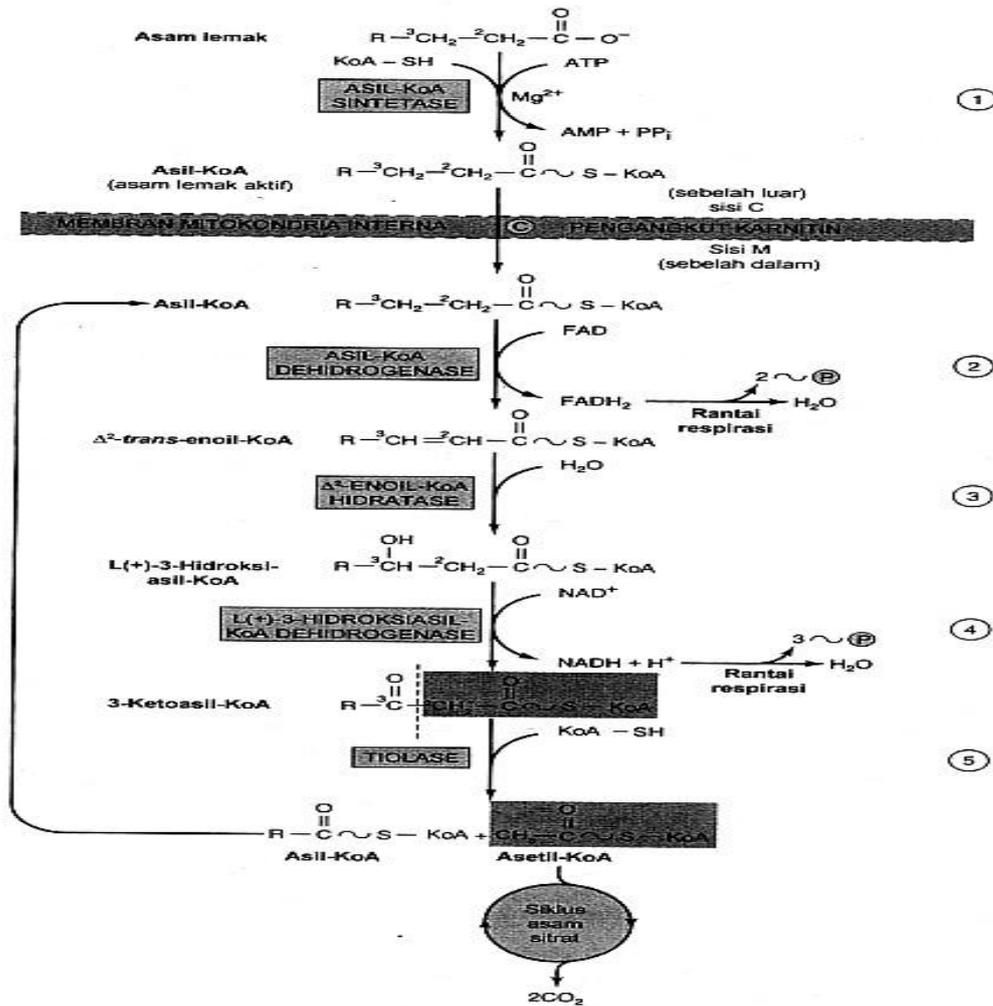


Keterangan:

Frekuensi oksidasi β adalah  $(\frac{1}{2} \text{ jumlah atom C}) - 1$

Jumlah asetil KoA yang dihasilkan adalah  $(\frac{1}{2} \text{ jumlah atom C})$

Oksidasi asam lemak dengan 16 atom C. Perhatikan bahwa setiap proses pemutusan 2 atom C adalah proses oksidasi β dan setiap 2 atom C yang diputuskan adalah asetil KoA.



Gambar 4.20. Aktivasi asam lemak, oksidasi beta dan siklus asam sitrat

Telah dijelaskan bahwa asam lemak dapat dioksidasi jika diaktifkan terlebih dahulu menjadi asil-KoA. Proses aktivasi ini membutuhkan energi sebesar 2P. (-2P)

Setelah berada di dalam mitokondria, asil-KoA akan mengalami tahap-tahap perubahan sebagai berikut:

- Asil-KoA diubah menjadi delta<sup>2</sup>-trans-enoil-KoA. Pada tahap ini terjadi rantai respirasi dengan menghasilkan energi 2P (+2P)
- delta<sup>2</sup>-trans-enoil-KoA diubah menjadi L(+)-3-hidroksi-asil-KoA
- L(+)-3-hidroksi-asil-KoA diubah menjadi 3-Ketoasil-KoA. Pada tahap ini terjadi rantai respirasi dengan menghasilkan energi 3P (+3P)
- Selanjutnya terbentuklah asetil KoA yang mengandung 2 atom C dan asil-KoA yang telah kehilangan 2 atom C.

Dalam satu oksidasi beta dihasilkan energi 2P dan 3P sehingga total energi satu kali oksidasi beta adalah 5P. Karena pada umumnya asam lemak memiliki banyak atom C, maka asil-KoA yang masih ada akan mengalami oksidasi beta kembali dan kehilangan lagi 2 atom C

karena membentuk asetil KoA. Demikian seterusnya hingga hasil yang terakhir adalah 2 asetil-KoA.

Asetil-KoA yang dihasilkan oleh oksidasi beta ini selanjutnya akan masuk siklus asam sitrat.

## 2. Oksidasi Asam Lemak Tidak Jenuh Memerlukan 2 Tahap Enzimatis Tambahan

Asam lemak yang tidak jenuh banyak dijumpai dalam alam. Tiga diantaranya termasuk dalam golongan asam lemak *esensial* yaitu *asam linoleat*, *asam linolenat* dan *asam arakhidonat*. Pemecahan asam lemak-asam lemak tersebut pada dasarnya tidak berbeda dari degradasi asam lemak jenuh yang telah diterangkan sebelumnya. Tetapi karena adanya ikatan ganda, yang pada umumnya adalah *sis*, maka perlu ada cara khusus untuk menanganinya.

Dari tahapan reaksi oksidasi asam lemak jenuh dapat diketahui bahwa senyawa hasil antara pemecahan asam lemak ada satu yang berikatan ganda. Bentuk ikatan tersebut adalah *trans*. Oleh karena itu perlu adanya enzim khusus yang dapat mengubah bentuk ikatan dari *sis* menjadi *trans*.

Melalui kerja 2 enzim pembantu, siklus oksidasi asam lemak yang dijelaskan di atas dapat juga mengoksidasi asam lemak tidak jenuh yang biasa dimanfaatkan oleh sel sebagai bahan bakar. Kerja 2 enzim ini, yang satu suatu isomerase, dan yang lain sebagai epimerase dapat digambarkan oleh 2 contoh berikut.

Pertama, pada proses oksidasi asam oleat, suatu asam lemak tidak jenuh terdiri dari 18 karbon yang banyak dijumpai. Ikatan gandanya terjadi pada ikatan atom C nomor 9 dan 10 dan berbentuk *sis*. *Oleil-KoA* ini termasuk ke dalam jalur  $\beta$ -oksidasi dan secara bertahap dipisahkan *asetil-KoA*nya. Asam oleat pertama-tama diubah menjadi oleil KoA yang diangkut melalui membran mitokondria sebagai oleil-karnitin dan diubah menjadi oleil-KoA di dalam matriks. Molekul oleil KoA memasuki 3 putaran melalui siklus oksidasi asam lemak, menghasilkan 3 molekul asetil KoA dan ester KoA asam lemak tidak jenuh 12-karbon, dengan ikatan ganda *sis*nya di antara karbon nomor 3 dan 4.

Produk ini tidak dapat dikatalis oleh enzim selanjutnya pada siklus asam lemak normal, yaitu hidratase enoil-KoA, yang bekerja hanya terhadap ikatan ganda *trans*. Namun demikian, dengan kerja satu di antara dua enzim pembantu, yaitu isomerase enoil-KoA, *sis*  $\Delta^3$ -enoil-KoA diisomerasi menjadi *trans*- $\Delta^2$ -enoil-KoA yang merupakan substrat normal bagi enoil KoA hidratase, yang lalu mengubahnya menjadi L-3-hidroksiasil-KoA yang bersangkutan. Produk ini sekarang dikatalis oleh enzim-enzim lainnya pada siklus asam lemak, menghasilkan asetil KoA dan asam lemak jenuh 10 karbon sebagai ester KoA nya. Senyawa yang terakhir ini mengalami 4 putaran lagi mengalami siklus normal asam lemak, menghasilkan 9 asetil KoA lainnya, dari satu molekul asam oleat 18 karbon.

Enzim pembantu lainnya, epimerase diperlukan untuk oksidasi banyak asam lemak tidak jenuh. Sebagai contoh, asam linoleat dengan 18 karbon yang memiliki 2 ikatan ganda *sis*, satu di antara karbon 9 dan 10 dan yang lain di antara karbon nomor 12 dan 13. Linoleil-KoA mengalami 3 putaran melalui urutan oksidasi asam lemak baku yang telah kita kenal,

menghasilkan 3 molekul asetil-KoA dan ester KoA asam lemak tidak jenuh 12 karbon dengan ikatan ganda sis di antara karbon 3 dan 4 seperti dalam oleil KoA, dan ikatan ganda sis lainnya di antara karbon nomor 6 dan 7. Ikatan ganda sis pada  $\Delta^3$  lalu diisomerisasi oleh enoil-KoA isomerase menjadi trans  $\Delta^2$ -enoil-KoA, yang mengalami reaksi selanjutnya dari urutan normal oksidatif, menghasilkan molekul asetil KoA. 1 putaran selanjutnya menghasilkan asil lemak KoA tidak jenuh dengan 8 karbon, selain molekul asetil-KoA. Asil lemak tersebut mengandung ikatan ganda sis  $\Delta^2$ . Molekul dapat dikatalisa oleh hidratase enoil-KoA, tapi produknya dalam hal ini adalah D stereoisomer dari 3-hidroksiasil-KoA, dan bukannya streoisomer L, yang biasanya terbentuk pada oksidasi asam lemak jenuh. Pada saat ini, enzim pembantu yang kedua, yaitu epimerase 3-hidroksiasil KoA menjalankan peranannya. Enzim ini melangsungkan epimerase D menjadi L-3-hidroksiasil-KoA yang sekarang dapat melangsungkan reaksi normal menjadi asetil KoA dan 6 karbon molekul asil KoA yang jenuh. Molekul ini lalu dioksidasi seperti proses yang telah kita kenal, menghasilkan tambahan 3 asetil KoA. Hasil keseluruhannya adalah bahwa asam linoleat di ubah menjadi 9 asetil KoA dengan bantuan 2 enzim pembantu.

### 3. Oksidasi asam lemak beratom karbon ganjil

Asam lemak dengan atom karbon ganjil jarang ditemui di alam. Cara oksidasi asam lemak beratom karbon ganjil adalah sama dengan oksidasi asam lemak beratom karbon genap, kecuali pada daur akhir degradasi akan terbentuk propionil KoA dan asetil KoA, bukan dua molekul asetil KoA. Unit tiga karbon aktif pada jalur propionil KoA memasuki daur asam sitrat setelah diubah menjadi suksinil KoA.

Propionil KoA mengalami karboksilasi menggunakan ATP dan menghasilkan metal-malonil KoA isomer D. Malonil KoA mengalami rasemasi menjadi isomer L, suatu substrat untuk enzim mutase yang mengubahnya menjadi suksinil KoA.

Suksinil KoA dibentuk dari L metalmalonil KoA melalui penataan kembali intramolekul. Gugus  $-\text{CO-S-KoA}$  bergeser dari C-2 ke C-3 menggantikan atom H. Isomerisasi yang sangat tidak biasa ini dikatalisis oleh enzim metilmalonil KoA mutase, satu dari dua enzim mamalia yang diketahui mengandung derivat vitamin B<sub>12</sub> sebagai koenzimnya. Jalur dari propionil KoA ke suksinil KoA juga berperan sebagai tempat masuk untuk beberapa karbon dari metionin, isoleusin, dan valin.

#### a. Oksidasi Alfa

Jalur oksidasi beta merupakan jalur utama untuk katabolisme asam lemak, tetapi asam lemak juga dapat dikatabolisme melalui jalur oksidasi alfa atau oksidasi omega. Dalam oksidasi alfa, molekul asam lemak akan mengalami oksidasi pada atom C-alfa atau C2 menghasilkan 2-hidroperoksi asam lemak, dan ini merupakan senyawa yang tidak stabil dan segera mengalami dekarboksilasi menjadi aldehida lemak dengan berkurangnya satu atom C atau menjadi 2-hidroksi asam lemak. Aldehida lemak yang telah berkurang 1 atom C nya lalu teroksidasi menjadi asam lemak bebas yang selanjutnya dapat mengalami oksidasi alfa.

b. Oksidasi Omega

Oksidasi omega asam lemak merupakan jalur katabolisme minor, namun menjadi jalur alternatif apabila jalur beta tidak berjalan dengan baik. Enzim oksidasi omega asam lemak hanya dimiliki oleh beberapa spesies hewan. Dalam jalur oksidasi omega, asam lemak mengalami oksidasi pada atom C omega yaitu atom C yang terjauh dari gugus karboksilat.

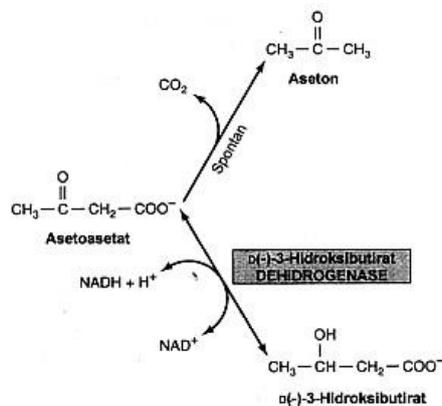
4. Penghitungan Energi Hasil Metabolisme Lipid

Dari uraian di atas kita bisa menghitung energi yang dihasilkan oleh oksidasi beta suatu asam lemak. Misalnya tersedia sebuah asam lemak dengan 10 atom C, maka kita memerlukan energi 2 ATP untuk aktivasi, dan energi yang di hasilkan oleh oksidasi beta adalah 10 dibagi 2 dikurangi 1, yaitu 4 kali oksidasi beta, berarti hasilnya adalah  $4 \times 5 = 20$  ATP. Karena asam lemak memiliki 10 atom C, maka asetil-KoA yang terbentuk adalah 5 buah.

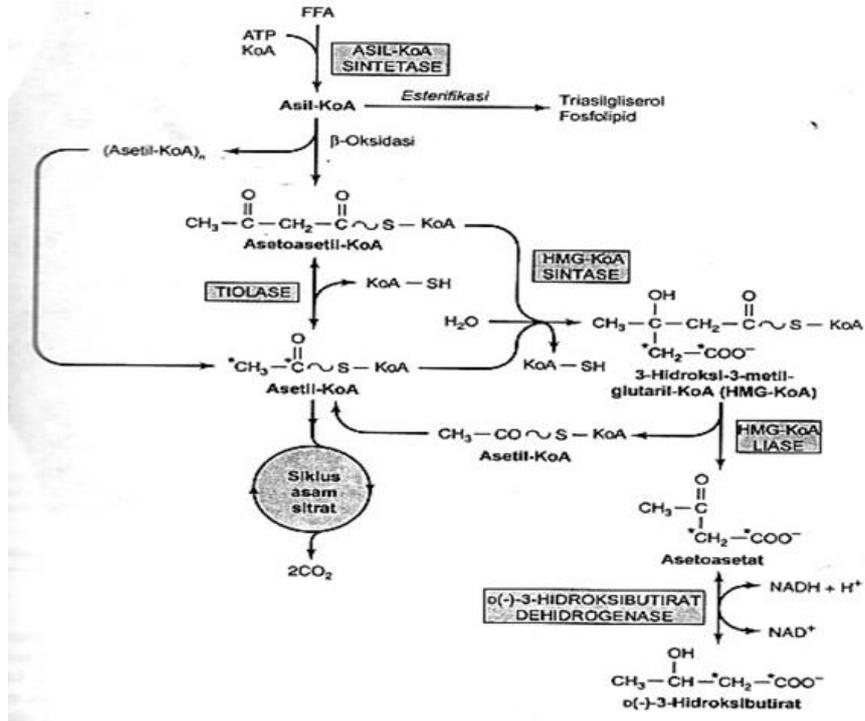
Setiap asetil-KoA akan masuk ke dalam siklus Krebs yang masing-masing akan menghasilkan 12 ATP, sehingga totalnya adalah  $5 \times 12 \text{ ATP} = 60 \text{ ATP}$ . Dengan demikian sebuah asam lemak dengan 10 atom C, akan dimetabolisir dengan hasil  $-2 \text{ ATP}$  (untuk aktivasi) +  $20 \text{ ATP}$  (hasil oksidasi beta) +  $60 \text{ ATP}$  (hasil siklus Krebs) =  $78 \text{ ATP}$ .

Sebagian dari asetil-KoA akan berubah menjadi asetoasetat, selanjutnya asetoasetat berubah menjadi hidroksi butirat dan aseton. Asetoasetat, hidroksi butirat dan aseton dikenal sebagai badan-badan keton. Proses perubahan asetil-KoA menjadi benda-benda keton dinamakan ketogenesis. Konsentrasi badan keton di dalam darah hewan menyusui normalnya  $< 0,2 \text{ mmol/L}$ , kecuali pada ruminansia yang sel-sel epitel dinding rumennya secara kontinyu mengubah asam butirat menjadi D-beta-hidroksibutirat dan pada manusia, badan-badan keton dihasilkan oleh sel-sel hati.

Pada kondisi kelaparan dimana tubuh tidak memperoleh asupan karbohidrat dalam waktu lama atau pada penderita diabetes mellitus, maka tubuh terpaksa menggunakan zat-zat lipid sebagai sumber energi dan akibatnya kadar badan keton di dalam darah akan meningkat dan disebut ketosis. Badan keton bersifat asam sehingga produksi badan keton berlebih dalam waktu cukup panjang yang menyebabkan pH darah menjadi asam dan disebut ketoasidosis, hal ini merupakan kondisi berbahaya yang dapat membawa kematian. Ketoasidosis merupakan salah satu komplikasi diabetes mellitus yang sangat ditakuti.

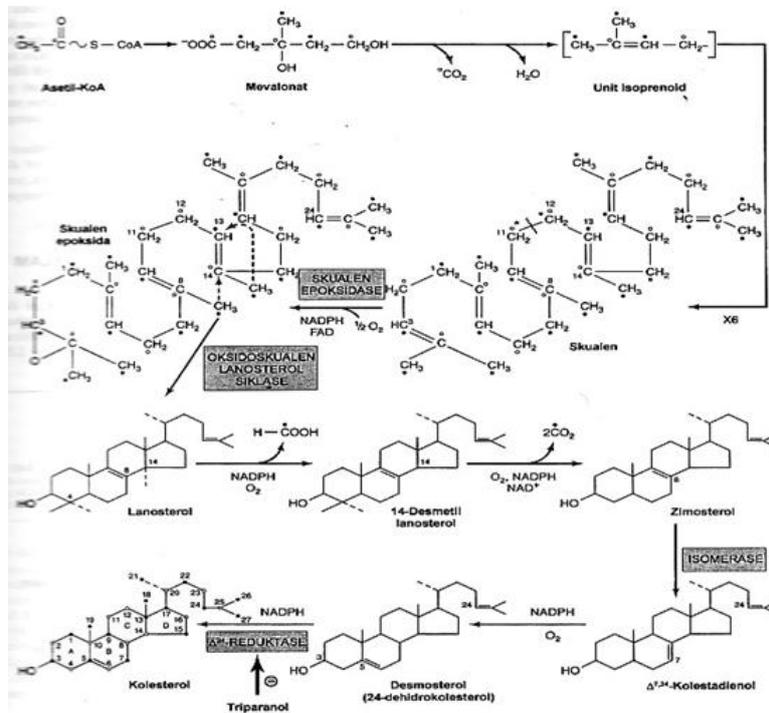


Gambar 4.21. Proses ketogenesis



Gambar 4.22. Lintasan ketogenesis di hati

Sebagian dari asetil KoA dapat diubah menjadi kolesterol (prosesnya dinamakan kolesterogenesis) yang selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan untuk disintesis menjadi steroid (prosesnya dinamakan steroidogenesis).



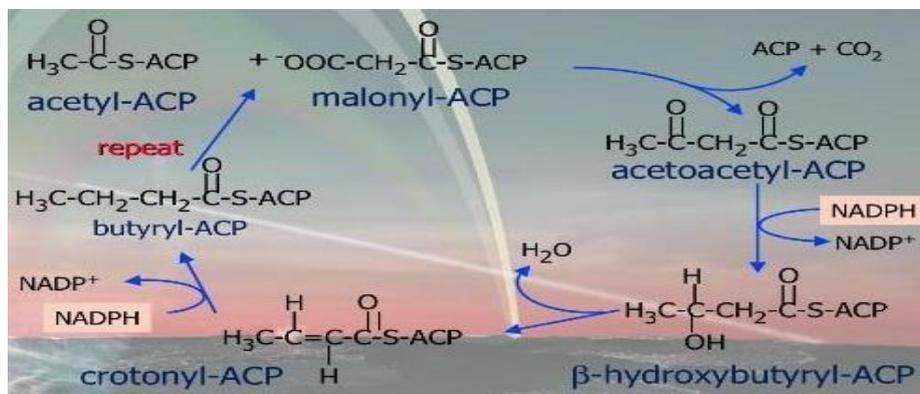
Gambar 4.33 Lintasan kolesterogenesis

## B. SINTESIS ASAM LEMAK

Makanan bukan satu-satunya sumber lemak kita. Semua organisme dapat mensintesis asam lemak sebagai cadangan energi jangka panjang dan sebagai penyusun struktur membran. Pada manusia, kelebihan asetil KoA dikonversi menjadi ester asam lemak. Sintesis asam lemak sesuai dengan degradasinya (oksidasi beta).

Sintesis asam lemak terjadi di dalam sitoplasma. ACP (acyl carrier protein) digunakan selama sintesis sebagai titik pengikatan. Semua sintesis terjadi di dalam kompleks multi enzim-fatty acid synthase. NADPH digunakan untuk sintesis.

Tahap-tahap sintesis asam lemak ditampilkan pada skema berikut.

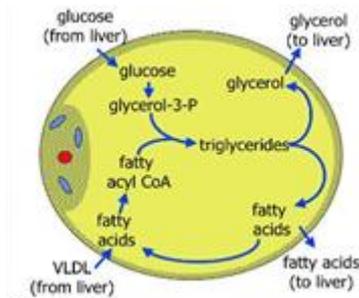


Gambar 4.24. Tahap-tahap sintesis asam lemak

### 1. Penyimpanan lemak dan penggunaannya kembali

Asam-asam lemak akan disimpan jika tidak diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi. Tempat penyimpanan utama asam lemak adalah jaringan adiposa. Adapun tahap-tahap penyimpanan tersebut adalah:

- Asam lemak ditransportasikan dari hati sebagai kompleks VLDL.
- Asam lemak kemudian diubah menjadi trigliserida di sel adiposa untuk disimpan.
- Gliserol 3-fosfat dibutuhkan untuk membuat trigliserida. Ini harus tersedia dari glukosa.
- Akibatnya, kita tak dapat menyimpan lemak jika tak ada kelebihan glukosa di dalam tubuh.



*Gambar 4.25 Dinamika lipid di dalam sel adiposa.  
Perhatikan tahap-tahap sintesis dan degradasi trigliserida*

Jika kebutuhan energi tidak dapat tercukupi oleh karbohidrat, maka simpanan trigliserida ini dapat digunakan kembali. Trigliserida akan dipecah menjadi gliserol dan asam lemak. Gliserol dapat menjadi sumber energi. Sedangkan asam lemak pun akan dioksidasi untuk memenuhi kebutuhan energi pula

## LATIHAN

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

- 1) Jelaskan langkah – langkah masuknya Asil KoA kedalam mitokondria !
- 2) Dalam satu kali proses oksidasi beta, energi yang dihasilkan sebanyak !
- 3) Jelaskan apa yang terjadi jika kebutuhan energi tidak tercukupi oleh karbohidrat !

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Langkah-langkah masuknya Asil KoA kedalam mitokondria adalah sebagai berikut.
  - Asam lemak bebas (FFA) diaktifkan menjadi asil-KoA dengan dikatalisir oleh enzim tiokinase.
  - Setelah menjadi bentuk aktif, asil-KoA dikonversikan oleh enzim karnitin palmitoil transferase I yang terdapat pada membran eksterna mitokondria menjadi asil karnitin. Setelah menjadi asil karnitin, barulah senyawa tersebut bisa menembus membran interna mitokondria.
  - Pada membran interna mitokondria terdapat enzim karnitin asil karnitin translokase yang bertindak sebagai pengangkut asil karnitin ke dalam dan karnitin keluar.
  - Asil karnitin yang masuk ke dalam mitokondria selanjutnya bereaksi dengan KoA dengan dikatalisir oleh enzim karnitin palmitoiltransferase II yang ada di membran interna mitokondria menjadi Asil Koa dan karnitin dibebaskan.
  - Asil KoA yang sudah berada dalam mitokondria ini selanjutnya masuk dalam proses oksidasi beta.

- 2) 5P
- 3) Jika kebutuhan energi tidak tercukupi oleh karbohidrat maka simpanan trigliserida ini dapat digunakan kembali. Trigliserida akan dipecah menjadi gliserol dan asam lemak. Gliserol dapat menjadi sumber energi. Sedangkan asam lemak pun akan dioksidasi untuk memenuhi kebutuhan energi pula.

## RINGKASAN

Lipid yang kita peroleh sebagai sumber energi utamanya adalah dari lipid netral, yaitu trigliserid (ester antara gliserol dengan 3 asam lemak). Secara ringkas, hasil dari pencernaan lipid adalah asam lemak dan gliserol, selain itu ada juga yang masih berupa monogliserid. Karena larut dalam air, gliserol masuk sirkulasi portal (vena porta) menuju hati. Hasil akhir dari pemecahan lipid dari makanan adalah asam lemak dan gliserol. Jika sumber energi dari karbohidrat telah mencukupi, maka asam lemak mengalami esterifikasi yaitu membentuk ester dengan gliserol menjadi trigliserida sebagai cadangan energi jangka panjang.

Asam lemak dengan atom karbon ganjil jarang ditemui di alam. Cara oksidasi asam lemak beratom karbon ganjil adalah sama dengan oksidasi asam lemak beratom karbon genap, kecuali pada daur akhir degradasi akan terbentuk propionil KoA dan asetil KoA,

Makanan bukan satu-satunya sumber lemak kita. Semua organisme dapat men-sintesis asam lemak sebagai cadangan energi jangka panjang dan sebagai penyusun struktur membran. Pada manusia, kelebihan asetil KoA dikonversi menjadi ester asam lemak. Sintesis asam lemak sesuai dengan degradasinya (oksidasi beta). Asam-asam lemak akan disimpan jika tidak diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi. Tempat penyimpanan utama asam lemak adalah jaringan adiposa. Jika kebutuhan energi tidak dapat tercukupi oleh karbohidrat, maka simpanan trigliserida ini dapat digunakan kembali. Trigliserida akan dipecah menjadi gliserol dan asam lemak. Gliserol dapat menjadi sumber energi. Sedangkan asam lemak pun akan dioksidasi untuk memenuhi kebutuhan energi pula

## TES 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Hasil dari pencernaan lipid adalah :
  - A. asam lemak dan gliserol
  - B. asam lemak dan asetil KoA
  - C. gliserol dan asetil KoA
  - D. ATP dan asam lemak
  
- 2) Asam lemak mengalami esterifikasi yaitu membentuk :
  - A. Gliserol
  - B. Asetil KoA

- C. Triglisericid
  - D. Ester
- 3) Asam lemak rantai panjang akan dapat masuk ke dalam mitokondria dengan bantuan senyawa :
- A. ATP
  - B. Karnitin
  - C. Asetil KoA
  - D. Triglisericid
- 4) Asam lemak diaktifkan dengan dikatalisir oleh enzim :
- A. Tiokinase
  - B. Lipase
  - C. Tripsin
  - D. Amilase
- 5) Unit tiga karbon aktif pada jalur propionil KoA memasuki daur asam sitrat setelah diubah menjadi :
- A. ATP
  - B. Gliserol
  - C. Triglisericid
  - D. Suksinil KoA
- 6) Dalam satu oksidasi beta dihasilkan energi sebanyak :
- A. 3P
  - B. 4P
  - C. 5P
  - D. 6P
- 7) Sintesis asam lemak terjadi di dalam :
- A. Mitokondria
  - B. Lisosom
  - C. Ribosom
  - D. Sitoplasma
- 8) Kolesterologenesis adalah :
- A. Perubahan Asetil KoA menjadi Kolesterol
  - B. Perubahan Triglisericida menjadi Kolesterol
  - C. Perubahan Gliserol menjadi Kolesterol
  - D. Perubahan Asam lemak menjadi Kolesterol

- 9) Steroidogenesis adalah :
- A. Perubahan Asam lemak menjadi Steroid
  - B. Perubahan Triglisericid menjadi Steroid
  - C. Perubahan Kolesterol menajdi Steroid
  - D. Perubahan Gliserol menjadi Steroid
- 10) Ketogenesis adalah :
- A. Proses perubahan Asetil-KoA menjadi benda-benda keton
  - B. Proses perubahan Kolesterol menjadi benda-benda keton
  - C. Proses perubahan Steroid menjadi benda-benda keton
  - D. Proses perubahan Gliserol menjadi benda-benda keton

## Kunci Jawaban Tes

### Tes 1

1) A

Klasifikasi lemak terdiri dari : lemak sederhana, lemak campuran dan lemak turunan (derived lipid).

- Lemak sederhana adalah ester asam lemak dengan berbagai alkohol. Lemak sederhana terdiri dari lemak dan lilin.
- Lipid campuran adalah ester asam lemak yang mengandung gugus tambahan selain alkohol dan asam lemak. Lipid campuran terdiri dari fosfolipid, glikolipid dan lipid campuran lain.
- Lemak turunan adalah zat yang diturunkan dari golongan-golongan diatas dengan hidrolisis. Ini termasuk asam lemak (jenuh dan tidak jenuh), gliserol, steroid, alkohol disamping gliserol dan sterol, aldehida lemak dan benda keton.

2) D

Lemak sederhana adalah ester asam lemak dengan berbagai alkohol. Lemak sederhana terdiri dari lemak dan lilin.

3) B

Asam lemak jenuh (saturated fatty acid) = Asam lemak ini tidak memiliki ikatan rangkap

Asam lemak tak jenuh (unsaturated fatty acid) = Asam lemak ini memiliki satu atau lebih ikatan rangkap.

4) B

#### ASAM LEMAK TIDAK JENUH

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Palmitoleat (heksadesenoat)	$C_{16}H_{30}O_2$	Cair
Oleat (oktadesenoat)	$C_{18}H_{34}O_2$	Cair
Linoleat (oktadekadienoat)	$C_{18}H_{32}O_2$	Cair
Linolenat (oktadekatrienoat)	$C_{18}H_{30}O_2$	Cair
Arakidonat (eikosatetrienoat)	$C_{20}H_{32}O_2$	Cair
Klupanodonat (dokosapentaenoat)	$C_{22}H_{34}O_2$	Cair

5) C

#### ASAM LEMAK JENUH

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Butirat (butanoat)	$C_4H_8O_2$	Cair
Kaproat (hexanoat)	$C_6H_{12}O_2$	Cair

Asam-asam lemak	Formula	Titik cair (°C)
Kaprilat (oktanoat)	$C_8H_{16}O_2$	16
Kaprat (dekanoat)	$C_{10}H_{20}O_2$	31
Laurat (dodekanoat)	$C_{12}H_{24}O_2$	44
Miristat (tetradekanoat)	$C_{14}H_{28}O_2$	54
Palmitat (heksadekanoat)	$C_{16}H_{32}O_2$	63
Stearat (oktadekanoat)	$C_{18}H_{36}O_2$	70
Arakidat (eikosanoat)	$C_{20}H_{40}O_2$	76
Lignoserat (tetrakosanoat)	$C_{24}H_{48}O_2$	86

6) C

Perbedaan sifat secara umum dari keduanya adalah:

Lemak

- Umumnya diperoleh dari hewan
- Berwujud padat pada suhu ruang
- Tersusun dari asam lemak jenuh

Minyak

- Umumnya diperoleh dari tumbuhan
- Berwujud cair pada suhu ruang
- Tersusun dari asam lemak tak jenuh

7) A

Lipid bersifat dapat disabunkan dan tidak tersabunkan. Salah satu kelas utama lipid yang tidak tersabunkan adalah steroid. Steroid merupakan komponen penting membran. Steroid adalah molekul kompleks yang larut didalam lemak dengan 4 cincin yang saling bergabung. Steroid yang paling banyak adalah sterol, yang merupakan steroid alkohol.

8) C

Lemak yang diemulsikan oleh garam empedu dirombak oleh esterase yang memecah ikatan ester yang menghubungkan asam lemak dengan gliserol. Lipase, yang sebagian besar dihasilkan oleh pankreas, meskipun usus halus juga menghasilkan sedikit, merupakan esterase utama pada unggas.

9) B

Gliserida netral adalah ester antara asam lemak dengan gliserol. Fungsi dasar dari gliserida netral adalah sebagai simpanan energi (berupa lemak atau minyak). Setiap gliserol mungkin berikatan dengan 1, 2 atau 3 asam lemak yang tidak harus sama.

10) A

Asam Palmitat =  $CH_3(CH_2)_{14}COOH$

Stearat =  $C_{18}H_{36}O_2$

Oleat = C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>  
 Linoleat = C<sub>18</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>

Tes 2

1) A

Lipid yang kita peroleh sebagai sumber energi utamanya adalah dari lipid netral, yaitu trigliserid (ester antara gliserol dengan 3 asam lemak). Secara ringkas, hasil dari pencernaan lipid adalah asam lemak dan gliserol, selain itu ada juga yang masih berupa monogliserid.

2) C

Di dalam sel-sel hati dan jaringan adiposa, kilomikron segera dipecah menjadi asam-asam lemak dan gliserol. Selanjutnya asam-asam lemak dan gliserol tersebut, dibentuk kembali menjadi simpanan trigliserida. Proses pembentukan trigliserida ini dinamakan esterifikasi

3) B

Asam lemak bebas pada umumnya berupa asam-asam lemak rantai panjang. Asam lemak rantai panjang ini akan dapat masuk ke dalam mitokondria dengan bantuan senyawa karnitin, dengan rumus (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N<sup>+</sup>-CH<sub>2</sub>-CH(OH)-CH<sub>2</sub>-COO<sup>-</sup>.

4) A

Untuk memperoleh energi, asam lemak dapat dioksidasi dalam proses yang dinamakan oksidasi beta. Sebelum dikatabolisir dalam oksidasi beta, asam lemak harus diaktifkan terlebih dahulu menjadi asil-KoA. Dengan adanya ATP dan Koenzim A, asam lemak diaktifkan dengan dikatalisir oleh enzim asil-KoA sintetase (Tiokinase).

5) D

Asam lemak dengan atom karbon ganjil jarang ditemui di alam. Cara oksidasi asam lemak beratom karbon ganjil adalah sama dengan oksidasi asam lemak beratom karbon genap, kecuali pada daur akhir degradasi akan terbentuk propionil KoA dan asetil KoA, bukan dua molekul asetil KoA. Unit tiga karbon aktif pada jalur propionil KoA memasuki daur asam sitrat setelah diubah menjadi suksinil KoA. Suksinil KoA dibentuk dari L metalmalonil KoA melalui penataan kembali intramolekul. Gugus -CO-S-KoA bergeser dari C-2 ke C-3 menggantikan atom H.

6) C

- Asil-KoA diubah menjadi delta<sup>2</sup>-trans-enoil-KoA. Pada tahap ini terjadi rantai respirasi dengan menghasilkan energi 2P (+2P)
- delta<sup>2</sup>-trans-enoil-KoA diubah menjadi L(+)-3-hidroksi-asil-KoA
- L(+)-3-hidroksi-asil-KoA diubah menjadi 3-Ketoasil-KoA. Pada tahap ini terjadi rantai respirasi dengan menghasilkan energi 3P (+3P)
- Selanjutnya terbentuklah asetil KoA yang mengandung 2 atom C dan asil-KoA yang telah kehilangan 2 atom C.

Dalam satu oksidasi beta dihasilkan energi 2P dan 3P sehingga total energi satu kali oksidasi beta adalah 5P.

- 7) D  
Sintesis asam lemak terjadi di dalam sitoplasma. ACP (acyl carrier protein) digunakan selama sintesis sebagai titik pengikatan. Semua sintesis terjadi di dalam kompleks multi enzim-fatty acid synthase. NADPH digunakan untuk sintesis.
- 8) A  
Sebagian dari asetil KoA dapat diubah menjadi kolesterol (prosesnya dinamakan kolesterogenesis)
- 9) C  
Sebagian dari asetil KoA dapat diubah menjadi kolesterol (prosesnya dinamakan kolesterogenesis) yang selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan untuk disintesis menjadi steroid (prosesnya dinamakan steroidogenesis).
- 10) A  
Asetil KoA sebagai hasil oksidasi asam lemak juga berpotensi menghasilkan badan-badan keton (aseto asetat, hidroksi butirat dan aseton). Proses ini dinamakan ketogenesis.

## Daftar Pustaka

Berg JM, Tymoczko JL, Stryer L. 2007. *Biochemistry 6 th ed*. New York: WH Freeman and Company.

Moran LA, Horton HR, Scrimgeour KG. 2012. *Principles of Biochemistry 5 th ed*. New York: Pears.

Nelson DL, Cox MM. 2004. *Lehninger Principles of Biochemistry 4 th ed*. London: WH Freeman.

Yohanis, Ngili. 2013. *Biokimia Dasar, edisi ke-1*, Bandung: Penerbit Rekayasa Sains.

David Page. 1985. *Prinsip-prinsip Biokimia, edisi ke-2*. Penerbit Erlangga.

## BAB V ENZIM

*Dra. Mimin Kusmiyati, M.Si.*

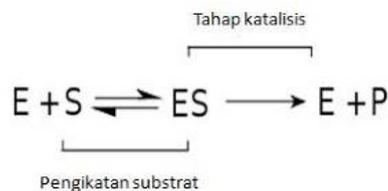
### PENDAHULUAN

Enzim adalah biomolekul yang mempercepat reaksi kimia. Enzim terdiri dari satu atau beberapa gugus polipeptida (protein) yang berfungsi sebagai katalis (senyawa yang mempercepat proses reaksi tanpa habis bereaksi) dalam suatu reaksi kimia.

Beberapa enzim mempercepat (katalisis) satu reaksi tertentu dan tidak dapat mengkatalisis yang lain. Misalnya di dalam proses fermentasi yang melibatkan alkohol, senyawa 6-karbon glukosa putus menjadi dua molekul etanol dan dua molekul karbon dioksida. Proses ini memerlukan 12 tahap enzimatik. Pada tahap terakhir asetaldehid direduksi menjadi etanol melalui aksi enzim dehidrogenasi.

Mekanisme paling sederhana yang menjelaskan tentang mekanisme aksi enzim adalah Michaelis-Menten. Mekanisme ini melibatkan suatu spesies pereaksi yang disebut substrat (S), yang mengikatkan dirinya pada sisi aktif enzim (E).

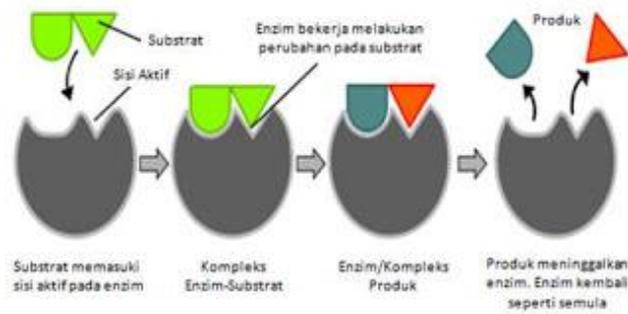
Hasilnya ialah terbentuknya kompleks enzim-substrat (ES). Kompleks ini terurai menghasilkan spesies hasil reaksi (P) dan enzim semula (E). Jadi mekanisme dua tahap dapat dituliskan, setiap tahap berlangsung bolak-balik (digambarkan dengan tanda panah rangkap).



*Mekanisme pembentukan E-S yang ditulis dalam bentuk tanda panah rangkap*

Secara garis besar, kerja enzim dapat dijelaskan dalam tiga tahap. Pertama, substrat (S) melekat pada enzim (E) dengan ikatan non kovalen membentuk kompleks enzim-substrat (ES). Kedua, enzim (E) melakukan reaksi kimia pada substrat (S) membentuk kompleks enzim-produk (EP). Produk (P) meninggalkan tapak aktif enzim (E), dan enzim (E) tersebut siap melakukan proses yang sama pada substrat (S) yang baru.

Enzim bekerja dengan cara menempel pada permukaan molekul zat-zat yang bereaksi untuk kemudian mempercepat proses reaksi. Secara lebih jelas enzim bekerja dengan cara menurunkan energi keaktifan yang dengan sendirinya akan mempermudah terjadinya reaksi, sehingga akan mempercepat jalannya reaksi.



Gambar 5.1. Mekanisme reaksi enzim

Enzim bekerja secara spesifik, dengan kata lain setiap jenis enzim hanya dapat bekerja pada satu jenis senyawa atau reaksi kimia tertentu. Kerja enzim dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah suhu, pH, kofaktor, dan inhibitor. Tiap-tiap enzim memiliki suhu dan pH (tingkat keasaman) yang berbeda-beda yang disebabkan karena strukturnya juga berbeda. Di luar suhu atau pH yang sesuai, enzim tidak dapat bekerja secara optimal atau strukturnya mengalami kerusakan. Hal ini akan menyebabkan enzim kehilangan fungsinya sama sekali. Kerja enzim juga dipengaruhi oleh kofaktor dan inhibitor.

Enzim adalah senyawa-senyawa protein yang berperan sebagai biokatalisator. Hampir semua reaksi di dalam tubuh makhluk hidup dikendalikan oleh enzim.

Materi yang akan dibahas pada bab 5 ini meliputi struktur kimia enzim, klasifikasi dan tata nama, prinsip kerja enzim, kinetika enzim, faktor-faktor yang mempengaruhi kerja enzim, dan regulasi aktivitas enzim.

Setelah mempelajari materi pada bab 5 ini, Anda diharapkan dapat menjelaskan enzim dan peranannya dalam proses pengendalian metabolisme yaitu reaksi dan proses di dalam tubuh makhluk hidup. Secara rinci, pada akhir proses pembelajaran Anda akan dapat:

1. Menjelaskan tentang struktur kimia enzim
2. Menjelaskan tentang struktur dan tata nama
3. Menjelaskan tentang prinsip kerja enzim
4. Menjelaskan tentang kinetika enzim
5. Menjelaskan tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kerja enzim
6. Menjelaskan tentang regulasi enzim

Cakupan materi pada bab 5 ini dikemas dalam 2 (dua) topik, yaitu:

- Topik 1. Enzim
- Topik 2. Klasifikasi dan Fungsi Enzim

Pengemasan materi ini dimaksudkan agar Anda lebih fokus dalam mempelajari setiap pokok bahasan. Dengan demikian pencapaian pembelajaran dapat dilakukan dengan lebih mudah dan lebih berhasil guna.

Materi yang perlu Anda kuasai sebelumnya dan yang akan sangat membantu Anda dalam memahami enzim adalah kimia dasar. Oleh karenanya, buka dan pelajari kembali materi tentang kimia dasar tersebut.

## Topik 1

# Enzim

Enzim merupakan senyawa protein dengan berat molekul sekitar 10.000 sampai dengan 2.000.000. d. Sebagian besar enzim dalam molekulnya memiliki bagian-bagian yang bukan polipeptida yang disebut kofaktor, sedangkan yang lainnya disebut apoenzim (rantai polipeptida) dan keseluruhannya disebut sebagai holoenzim.

Kofaktor dapat dibedakan menjadi 3 macam yaitu koenzim, gugus prostetik dan aktivator ion logam. Koenzim adalah senyawa nonprotein yang terdialisa, termotabil dan terikat secara longgar dan reversibel. Kofaktor umumnya berupa vitamin atau turunannya seperti vitamin B1, vitamin B2, vitamin B5, vitamin B6. Dalam mekanisme kerja enzim biasanya kofaktor berperan sebagai pentransfer gugus kimia tertentu dari satu reaktan ke reaktan lainnya.

Enzim adalah protein yang berfungsi sebagai katalisator untuk reaksi-reaksi kimia didalam sistem biologi. Katalisator mempercepat reaksi kimia. Walaupun katalisator ikut serta dalam reaksi, ia kembali ke keadaan semula bila reaksi telah selesai. Enzim adalah **katalisator protein** untuk reaksi-reaksi kimia pada sistem biologi. Sebagian besar reaksi tersebut tidak dikatalis oleh enzim.

Berbeda dengan katalisator nonprotein ( $H^+$ ,  $OH^-$ , atau ion-ion logam), tiap-tiap enzim mengkatalis sejumlah kecil reaksi, kerapkali hanya satu. Jadi enzim adalah katalisator yang reaksi-spesifik karena semua reaksi biokimia perlu dikatalis oleh enzim, harus terdapat banyak jenis enzim. Sebenarnya untuk hampir setiap senyawa organik, terdapat satu enzim pada beberapa organisme hidup yang mampu bereaksi dengan dan mengkatalis beberapa perubahan kimia.

Walaupun aktivitas katalik enzim dahulu diduga hanya diperlihatkan oleh sel-sel yang utuh (karena itu istilah en-zyme, yaitu, "dalam ragi"), sebagian besar enzim dapat diekstraksi dari sel tanpa kehilangan aktivitas biologik (katalik)nya. Oleh karena itu, enzim dapat diselidiki diluar sel hidup. Ekstrak yang mengandung enzim dipakai pada penyelidikan reaksi-reaksi metabolik dan pengaturannya, struktur dan mekanisme kerja enzim dan malahan sebagai katalisator dalam industri pada sintesis senyawa-senyawa yang biologis aktif seperti hormon dan obat-obatan. Karena kadar enzim serum manusia pada keadaan patologik tertentu dapat mengalami perubahan yang nyata, pemeriksaan kadar enzim serum merupakan suatu alat diagnostik yang penting bagi dokter.

Reaksi-reaksi seperti hidrolisa dan oksidasi berlangsung sangat cepat didalam sel-sel hidup pada pH kira-kira netral dan pada suhu tubuh. Ini dapat terjadi karena adanya enzim. Enzim disintesa di dalam sel, tetapi setelah diekstraksi diluar sel masih mempunyai aktivitas.

Enzim bekerja sangat sfesifik. Suatu enzim hanya dapat mengatalisa beberapa reaksi, malahan seringkali hanya satu reaksi saja. Ini merupakan salah satu sifat penting enzim.

Ada segolongan enzim yang dapat mengatalisa jenis reaksi yang sama, misalnya memindahkan fosfat, oksidasi-reduksi, dan sebagainya. Oleh karena itu, ada suatu kespesifikan (specificity).

## A. KESPESIFIKAN ENZIM

Kespesifikan enzim dapat dibedakan dalam:

### 1. *Kespesifikan Optik*

Dengan kekecualian epimerase (rasemase), yang saling mengubah isomer-isomer optik, enzim umumnya menunjukkan kespesifikan optik absolut untuk paling sedikit sebagian dari molekul substrat. Misalnya maltase dapat mengatalisa hidrolisa  $\alpha$ -glukosida, akan tetapi tidak dapat bekerja terhadap  $\beta$ -glukosida. Enzim yang bekerja terhadap D-karbohidrat tidak dapat mengatalisa L-karbohidrat, begitu pula dengan enzim-enzim yang mengatalisa asam L-amino tidak dapat mengatalisa asam D-amino. Kespesifikan optik dapat meluas kesuatu bagian molekul substrat atau ke substrat keseluruhannya. Glikosidase merupakan contoh dari dua hal yang ekstrim ini. Enzim-enzim ini yang mengkatalisis hidrolisis ikatan gliosida antara gula dan alkohol, sangat spesifik untuk bagian gula dan untuk ikatan (alfa atau beta), tetapi relatif nonspesifik untuk bagian alkohol atau glikogen.

### 2. *Kespesifikan Gugus*

Suatu enzim hanya dapat bekerja terhadap gugus yang khas, misalnya glikosidase terhadap gugus alkohol, pepsin dan tripsin terhadap ikatan peptida, sedangkan esterase terhadap gugus alkohol, pepsin dan tripsin terhadap ikatan peptida, sedangkan esterase terhadap ikatan ester. Akan tetapi, dalam pembatasan ini sejumlah besar substrat dapat diolah, jadi, misalnya, pengurangan jumlah enzim pencernaan yang mungkin sebaliknya dibutuhkan.

Enzim-enzim tertentu menunjukkan kespesifikan gugus yang lebih tinggi. Kamotripsin, terutama menghidrolisa ikatan peptida dimana gugus karboksilnya berasal dari asam-asam amino fenilalanin, tirosin atau triptofan. Karboksipeptidase dan amino peptidase memecahkan asam amino masing-masing dari ujung karboksil atau amino rantai polipeptida.

### 1. **Nomenklatur Enzim**

Biasanya enzim mempunyai akhiran -ase. Di depan -ase digunakan nama substrat di mana enzim itu bekerja, atau nama reaksi yang dikatalisis. Misal : selulase, dehidrogenase, urease, dan lain-lain. Tetapi pedoman pemberian nama tersebut diatas tidak selalu digunakann. Hal ini disebabkan nama tersebut digunakan sebelum pedoman pemberian nama diterima dan nama tersebut sudah umum digunakan. Misalnya pepsin, tripsin, dan lain-lain. Dalam Daftar Istilah Kimia Organik (1978), akhiran -ase tersebut diganti dengan -asa.

## 2. Struktur Enzim

Pada mulanya enzim dianggap hanya terdiri dari protein dan memang ada enzim yang ternyata hanya tersusun dari protein saja. Misalnya pepsin dan tripsin. Tetapi ada juga enzim-enzim yang selain protein juga memerlukan komponen selain protein. Komponen selain protein pada enzim dinamakan kofaktor. Koenzim dapat merupakan ion logam/ metal, atau molekul organik yang dinamakan koenzim. Gabungan antara bagian protein enzim (apoenzim) dan kofaktor dinamakan holoenzim.

Enzim yang memerlukan ion logam sebagai kofaktornya dinamakan metaloenzim.. Ion logam ini berfungsi untuk menjadi pusat katalis primer, menjadi tempat untuk mengikat substrat, dan sebagai stabilisator supaya enzim tetap aktif.

Tabel 5.1.

*Beberapa enzim yang mengandung ion logam sebagai kofaktornya*

Ion logam	Enzim
Zn <sup>2+</sup>	Alkohol dehidrogenase Karbonat anhidrasa Karboksiptidasa
Mg <sup>2+</sup>	Fosfohidrolasa Fosfotransferasa
Fe <sup>2+</sup> / Fe <sup>3+</sup>	Sitokrom Peroksida Katalasa Feredoksin
Cu <sup>2+</sup> / Cu <sup>+</sup>	Tirosina Sitokrom oksidasa
K <sup>+</sup>	Piruvat kinasa (juga memerlukan Mg <sup>2+</sup> )
Na <sup>+</sup>	Membrane sel ATPasa ( juga memerlukan K <sup>+</sup> dan Mg <sup>2+</sup> )

## 3. Aktivitas Enzim

Seperti halnya katalisator, enzim dapat mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasinya. Enzim tersebut akan bergabung sementara dengan reaktan sehingga mencapai keadaan transisi dengan energi aktivasi yang lebih rendah daripada energi aktivasi yang diperlukan untuk mencapai keadaan transisi tanpa bantuan katalisator atau enzim.

## B. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KECEPATAN REAKSI ENZIM

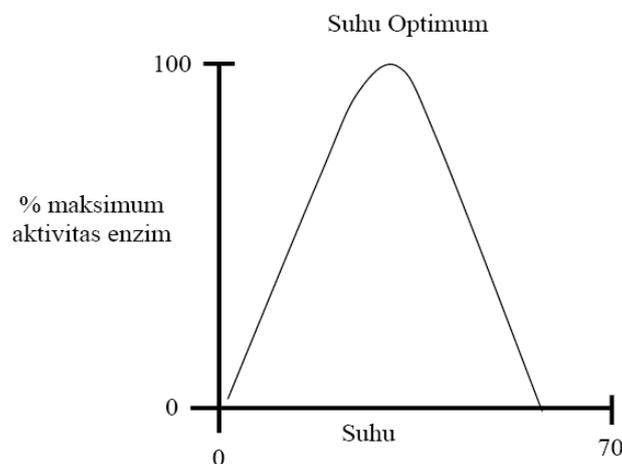
Perubahan suhu dan pH mempunyai pengaruh besar terhadap kerja enzim. Kecepatan reaksi enzim juga dipengaruhi oleh konsentrasi enzim dan konsentrasi substrat. Pengaruh aktivator, inhibitor, koenzim dan konsentrasi elektrolit dalam beberapa keadaan juga merupakan faktor-faktor yang penting. Hasil reaksi enzim juga dapat menghambat kecepatan reaksi.

### 1. Pengaruh Suhu

Suhu rendah yang mendekati titik beku biasanya tidak merusak enzim. Pada suhu dimana enzim masih aktif, kenaikan suhu sebanyak  $10^{\circ}\text{C}$ , menyebabkan keaktifan menjadi 2 kali lebih besar ( $Q_{10} = 2$ ). Pada suhu optimum reaksi berlangsung paling cepat. Bila suhu dinaikan terus, maka jumlah enzim yang aktif akan berkurang karena mengalami denaturasi. Enzim didalam tubuh manusia memiliki suhu optimum sekitar  $37^{\circ}\text{C}$ . Enzim organismemikro yang hidup dalam lingkungan dengan suhu tinggi mempunyai suhu optimum yang tinggi.

Sebagian besar enzim menjadi tidak aktif pada pemanasan sampai  $+ 60^{\circ}\text{C}$ . Ini disebabkan karena proses denaturasi enzim. Dalam beberapa keadaan, jika pemanasan dihentikan dan enzim didinginkan kembali aktivitasnya akan pulih. Hal ini disebabkan oleh karena proses denaturasi masih reversible. pH dan zat-zat pelindung dapat mempengaruhi denaturasi pada pemanasan ini.

Hubungan antara aktivitas enzim dan suhu dapat dilihat pada Gambar berikut.



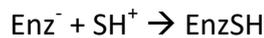
Gambar 5.2. Pengaruh suhu terhadap kecepatan reaksi enzim

### 2. Pengaruh pH

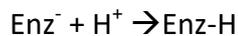
Bila aktivitas enzim diukur pada pH yang berlainan, maka sebagian besar enzim didalam tubuh akan menunjukkan aktivitas optimum antara pH 5,0 - 9,0, kecuali beberapa enzim misalnya pepsin (pH optimum = 2). Ini disebabkan oleh :

- a. Pada pH rendah atau tinggi, enzim akan mengalami denaturasi.
- b. Pada pH rendah atau tinggi, enzim maupun substrat dapat mengalami perubahan muatan listrik dengan akibat perubahan aktivitas enzim.

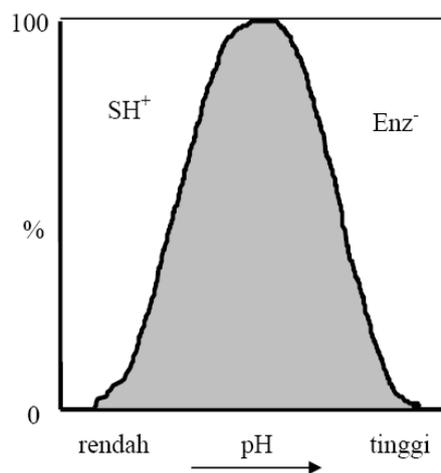
Misalnya suatu reaksi enzim dapat berjalan bila enzim tadi bermuatan negatif (Enz<sup>-</sup>) dan substratnya bermuatan positif (SH<sup>+</sup>) :



Pada pH rendah Enz<sup>-</sup> akan bereaksi dengan H<sup>+</sup> menjadi enzim yang tidak bermuatan.



Demikian pula pada pH tinggi, SH<sup>+</sup> yang dapat bereaksi dengan Enz<sup>-</sup>, maka pada pH yang ekstrem rendah atau tiggikonsentrasi efektif SH<sup>+</sup> dan enz akan berkurang, karena itu kecepatan reaksinya juga berkurang. Seperti pada gambar berikut.

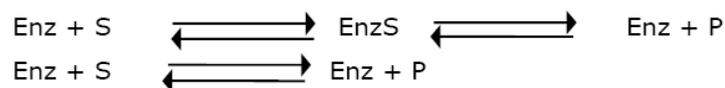


Gambar 5.3. Pengaruh pH terhadap kecepatan reaksi enzim

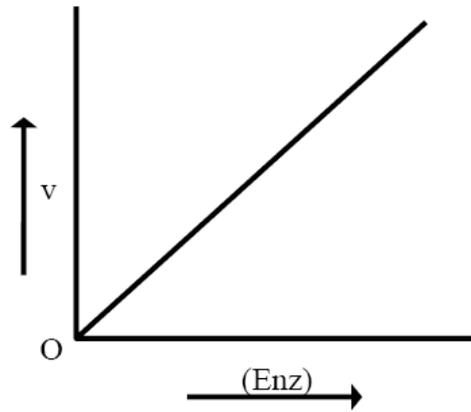
### 3. Pengaruh Konsentrasi Enzim

Kecepatan reaksi enzim (v) berbanding lurus dengan konsentrasi enzim (Enz). Makin besar jumlah enzim makin cepat reaksinya. Lihat pada gambar.

Dalam reaksinya Enz akan mengadakan ikatan dengan substrat S dan membentuk kompleks enzim-substrat, EnzS. EnzS ini akan dipecah menjadi hasil reaksi P dan enzim bebas Enz.



Makin banyak Enz terbentuk, makin cepat reaksi ini berlangsung. Ini terjadi sampai batas tertentu.



Gambar 5.4. Pengaruh (Enz) terhadap kecepatan reaksi

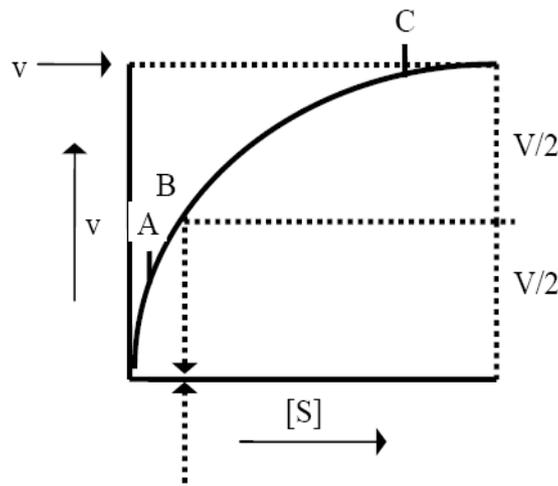
#### 4. Pengaruh Konsentrasi Substrat

Bila konsentrasi substrat (S) bertambah, sedangkan keadaan lainnya tetap sama, kecepatan reaksi juga akan meningkat sampai suatu batas maksimum V. Pada titik maksimum ini enzim telah *jenuh* dengan substrat. Seperti pada gambar.

Pada titik-titik A dan B belum semua enzim bereaksi dengan substrat, maka pada A dan B penambahan substrat S akan menyebabkan jumlah EnzS bertambah dan kecepatan reaksi v akan bertambah, sesuai dengan penambahan S.

Pada titik C semua enzim telah bereaksi dengan substrat, sehingga penambahan S tidak akan menambah kecepatan reaksi, karena tidak ada lagi enzim bebas.

Pada titik B kecepatan reaksi tepat setengah kecepatan maksimum. Konsentrasi substrat yang menghasilkan setengah kecepatan maksimum dinamakan harga  $K_m$  atau konstanta Michaelis.



Gambar 5.5. Pengaruh (S) terhadap kecepatan reaksi enzim

## 5. Zat Penghambat

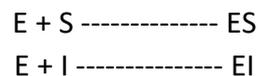
Zat penghambat (Inhibitor), yaitu molekul atau ion yang dapat menghambat reaksi pembentukan kompleks enzim-substrat. Hambatan yang dilakukan oleh inhibitor dapat berupa hambatan tidak reversibel atau hambatan reversibel.

### a. Hambatan Reversibel

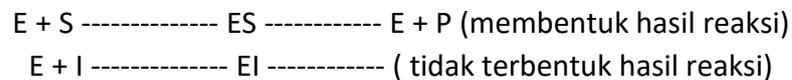
Hambatan reversibel dapat berupa hambatan bersaing atau hambatan tidak bersaing.

#### 1) Hambatan bersaing.

Hambatan bersaing disebabkan karena ada molekul mirip dengan substrat, yang dapat pula membentuk kompleks, yaitu kompleks enzim inhibitor (EI) pembentukan kompleks ES, yaitu melalui penggabungan inhibitor dengan enzim pada bagian aktif enzim. Dengan demikian terjadi persaingan antara inhibitor dengan substrat terhadap bagian aktif enzim melalui reaksi sebagai berikut :



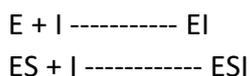
Inhibitor yang menyebabkan hambatan bersaing disebut inhibitor bersaing. Inhibitor ini menghalangi terbentuknya kompleks ES dengan cara membentuk kompleks EI dan tidak dapat membentuk hasil reaksi ( P ).



Dengan demikian adanya inhibitor bersaing dapat mengurangi peluang bagi terbentuknya kompleks ES dan hal ini menyebabkan berkurangnya kecepatan reaksi.

#### 2) Hambatan tak bersaing

Hambatan tidak bersaing (*non competitive inhibition*) tidak di pengaruhi oleh besarnya konsentrasi substrat dan inhibitor yang melakukannya (inhibitor tidak bersaing). Dalam hal ini inhibitor dapat bergabung dengan enzim di luar bagian aktif. Penggabungan antara inhibitor dengan enzim ini terjadi pada enzim bebas, atau pada enzim yang telah mengikat substrat yaitu kompleks enzim substrat.



### b. Hambatan tidak reversibel

Hambatan tidak reversibel ini dapat terjadi karena inhibitor bereaksi tidak reversibel dengan bagian tertentu pada enzim sehingga mengakibatkan berubahnya bentuk enzim.

Dengan demikian mengurangi aktivitas katalik enzim tersebut. Reaksi ini berlangsung tidak reversibel sehingga menghasilkan produk reaksi dengan sempurna.

## 6. Hambatan Alosterik

Hambatan yang terjadi pada enzim alosterik dinamakan hambatan alosterik, sedangkan inhibitor yang menghambat dinamakan inhibitor alosterik. Bentuk molekul inhibitor alosterik berkaitan dengan enzim pada tempat diluar bagian aktif enzim. Dengan demikian, hambatan ini tidak akan dapat diatasi dengan penambahan sejumlah besar substrat. Terbentuknya ikatan antara enzim dengan inhibitor mempengaruhi konformasi enzim, sehingga bagian aktif mengalami perubahan bentuk. Akibatnya, ialah penggabungan substrat pada bagian aktif enzim terhambat.

- a. Inhibitor/penghambat kompetitif, produk (sebagai zat inhibitor) berkompetisi dengan substrat untuk berikatan dengan sisi aktif enzim. Dapat diatasi dengan menambahkan konsentrasi substrat.
- b. Inhibitor/penghambat alosterik (non-kompetitif), produk (sebagai zat inhibitor) berikatan pada bagian enzim selain sisi aktif enzim yang disebut sisi alosterik dan menyebabkan sisi aktif berubah sehingga substrat tidak dapat berikatan dengan enzim

## 7. Pengaruh Faktor-Faktor Lain

Enzim dapat dirusak dengan pengocokan, penyinaran ultraviolet dan sinar-x, sinar- $\beta$  dan sinar- $\gamma$ . Untuk sebagian ini disebabkan karena oksidasi oleh peroxida yang dibentuk pada penyinaran tersebut. Kerja enzim juga dipengaruhi oleh adanya inhibitor seperti obat-obatan dan sebagainya.

## C. KLASIFIKASI DAN TATA NAMA ENZIM

Fungsi klasifikasi adalah untuk menekan hubungan dan persamaan dengan cara yang tepat dan singkat. Usaha semula untuk menciptakan suatu sistem tata nama enzim-enzim menghasilkan susunan yang membingungkan dari nama-nama yang tidak pasti artinya dan umumnya tidak mempunyai keterangan apa-apa seperti emulsin, peptin, dan zimase. Enzim selanjutnya diberi nama substratnya dengan menambah akhiran "ase". Jadi enzim-enzim yang memecahkan pati (amilon) disebut amilase; yang memecahkan lemak (lipos), lipase; dan yang bekerja pada protein, protease. Golongan enzim-enzim diberi nama oksidase, glikodase, dehidrogenase, dekarboksilase, dan sebagainya.

Gambaran utama sistem IUB (*Internasional Union of Biochemistry*) untuk klasifikasi enzim sebagai berikut:

1. Reaksi-reaksi (dan enzim-enzim yang mengkatalisisnya) dibagi dalam 6 kelas utama, masing-masing kelas dengan 4-13 sub-kelas. 6 kelas utama itu tersusun dibawah ini dengan beberapa contoh sub-kelas yang penting. Nama yang terdapat dalam kurungan adalah nama biasa yang lebih dikenal.

2. Nama enzim mempunyai 2 bagian. Yang *pertama* adalah nama substrat atau substrat-subtrat. Yang kedua, diakhiri dengan “ase”, menunjukkan jenis reaksi yang dikatalisis. Akiran “ase” tidak lagi tercantum langsung pada nama substrat.
3. Keterangan tambahan, bila diperlukan untuk menjelaskan sifat reaksi, dapat didikuti kata atau kalimat yang diberi tanda kurung. Misalnya, enzim yang mengkatalisis reaksi L-malat + NAD<sup>+</sup> + piruvat + CO<sub>2</sub> + NADH + H = dikenal sebagai enzim malat, dinamakan 1.1.137 L-malat: NAD oksidoreduktase (dekarboksilase).
4. Masing-masing enzim mempunyai nomer kode sistemik (E.C.). Nomer ini menunjukkan jenis reaksi sebagai kelas (digit pertama), sub-kelas (digit kedua), dan sub-kelas (digit ketiga). Digit keempat adalah untuk nama enzim tertentu. Jadi, E.C. 2.7.1.1. menyatakan kelas 2 (transferase), subkelas 7 (pemindahan fosfat), sub-kelas 1 (suatu alkohol berfungsi sebagai akseptor fosfat). Digit yang terakhir menyatakan enzim, heksokinase, atau ATP : D-heksosa-6-fosfotransferase, suatu enzim yang mengkatalis pemindahan fosfat dari ATP ke gugus hidroksil pada karbon 6 glikosa.

### 1. Oksidoreduktase

Merupakan kelompok enzim yang mengkatalisis reaksi oksidasi reduksi. Oksidoreduktase (bahasa Inggris: *acceptor reductase*) adalah keluarga enzim EC.1 sebagai katalisator reaksi oksido-reduksi. Substrat yang teroksidasi biasanya merupakan senyawa pendonor elektron atau hidrogen. Nama lain oksidoreduktase adalah dehidrogenase atau oksidase ketika senyawa akseptor reaksi berupa oksigen. Pada umumnya golongan enzim ini bekerja dengan NADP dan NAD<sup>+</sup> sebagai kofaktor. Enzim Oksidoreduktase adalah enzim yang berfungsi untuk memediasi suatu reaksi oksidasi-reduksi di tubuh yang terdiri dari dua jenis, yakni:

#### a. *Electron Carrier (Pembawa elektron).*

Suatu enzim oksidoreduktase digolongkan ke dalam kelompok ini jika dalam memediasi reaksi redoks, hanya terjadi secara *outersphere* sehingga tidak terjadi perubahan stabilitas ligan-ligan yang besar selama reaksinya. Hal ini terjadi jika koordinasi ion pusat penuh (tidak terdapat keadaan entatic) sehingga enzim tidak pernah ketempatan substrat, yakni hanya memediasi reaksi redoks dengan cara transfer elektron pada orbital t<sub>2g</sub>-nya. Contoh enzim jenis ini adalah kompleks sitokrom c, feredoksin (suatu kluster 2Fe-2S), dan plastosianin.

#### b. *Pusat Reaksi Redoks.*

Suatu enzim oksidoreduktase digolongkan ke dalam kelompok ini jika dalam memediasi reaksi redoks terjadi secara *innersphere* sehingga terjadi perubahan stabilitas yang besar pada ligan-ligan selama reaksinya. Enzim yang bertindak sebagai pusat reaksi redoks memberikan tempat fisik untuk terjadinya reaksi redoks yang melibatkan pemutusan dan penyambungan ikatan ligan (biasanya melibatkan orbital eg). Oleh karena itu, gangguan stabilitas ligan-ligan yang ditimbulkan besar. Ada pula jenis enzim ini yang berada dalam entatic state. Entatic state adalah bentuk senyawa kompleks yang tidak stabil karena mempunyai koordinasi kosong tetapi bentuk tidak stabil ini dipertahankan. Bentuk tidak

sabil ini dapat dipertahankan jika salah satu ligan yang terikat pada senyawa kompleks ini memiliki bentuk molekul yang sangat besar sehingga memberikan efek sterik besar yang mencegah ligan terakhir ion pusat senyawa kompleks ini diisi oleh ligan luar selain ligan substrat yang sesuai. Contoh enzim jenis ini adalah hemoglobin (sitokrom b), sitokrom P450, dan peroksidase. mengkatalisa reaksi oksidasi dan reduksi, misalnya alkohol : oksidoreduktase NAD mengkatalisa oksidasi alkohol menjadi aldehyd. Enzim ini melepaskan 2 buah elektron seperti 2 buah hidrogen dari alkohol untuk menghasilkan aldehyd.

Subkelas oksidoreduktase:

- 1) Oksidase, memindahkan 2 elektron dari donor ke oksigen, biasanya menyebabkan pembentukan peroksida hidrogen,
- 2) Oksigenase, mengkatalisa penggabungan ke dua atom oksigen kedalam suatu substrat tunggal.
- 3) Hidroksilase, menggabungkan sebuah atom molekul oksigen kedalam substrat; oksigen yang kedua timbul seperti air.
- 4) Peroksidase, mempergunakan peroksida hidrogen selain dari oksigen sebagai oksidan, peroksida NADH mengkatalisa reaksi
- 5) Katalase, unik didalam peroksida hidrogen kerja baik sebagai donor maupun akseptor. Kakatalase berfungsi didalam sel untuk mendetoksifikasikan peroksida hidrogen.

Enzim-enzim yang mengkatalisis oksidoreduksi antara 2 substrat s dan S'

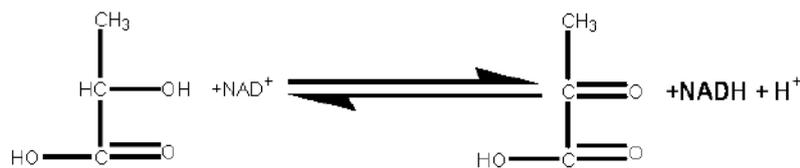
### Sred + S'oks + S'red

Kelas yang besar dan penting ini meliputi enzim-enzim yang juga dikenal sebagai dehidrogenase atau sebagai oksidase. Yang termasuk adalah enzim-enzim yang mengkatalisis oksidoreduksi dari gugus CH-OH, CH<sub>2</sub>, C=O, CH-NH<sub>2</sub>, dan CH=NH. Diantara subkelas yang mewakilinya adalah

**Enzim yang bekerja pada gugus Ch-OH sebagai donor elektron. Misalnya:**

Alkohol : NAD oksidoreduktase [ alkohol dehidrogenase ]

Alkohol + NAD<sup>+</sup> = aldehyd atau keton + NADH + H<sup>+</sup>



**Enzim yang bekerja pada gugus CH-NH<sub>2</sub> sebagai elektron.**

Misalnya :

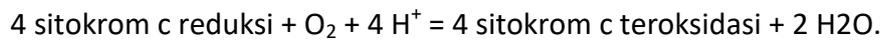
L-Glutamat : NAD (P) oksidoreduktase (deaminasi) [glutamat dehidrogenase dari hati binatang]. NAD (P) berarti bahwa baik NAD maupun cNADP bekerja sebagai akseptor elektron.



**Enzim yang bekerja pada gugus hem dari donor elektron.**

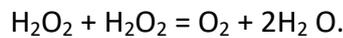
Misalnya :

Sitokrom c : O<sub>2</sub> oksidoreduktase [sitokrom oksedase].



Enzim yang bekerja pada H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebagai asektor elektron. Misalnya :

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oksidoreduktase [katalase].

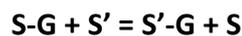


**2. Transferase.**

Enzim Transferase merupakan kelompok enzim yang mengkatalisis reaksi pemindahan gugus. Enzim Transferase, Enzim ini terlibat dalam memindahkan grup fungsional antara donor dengan akseptor. Amino, acyl, fosfat, satu karbon dan grup glikosil adalah salah satu dari 2 bagian sama besar yang ditransfer.

- a. *Aminotransferase (transaminase)*, mentransfer grup amino dari satu asam amino ke akseptor asam keto, dengan menghasilkan pembentukan asam amino yang baru dan asam keto yang baru
- b. *Kinase*, enzim yang memfosforilasi yaitu mengkatalisa pemindahan grup fosforil dari ATP atau trifosfat nukleotida lainnya ke alkohol atau akseptor grup amino, misalnya glukokinase.
- c. *Glukosiltransferase*, mengkatalisa transfer residu gluykosil yang aktif ke sebuah glikogen primer. Ikatan fosfoester didalam disfosfoglukosa uridin adalah labil, yang menyebabkan glukosa berpindah ke glikogen primer yang sedang berkembang.

Enzim-enzim yang mengkatalisis pemindahan suatu gugus, G (lain dari hidrogen), antara sepasang substrat S dan S'.

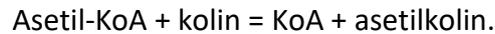


Dalam kelas ini termasuk enzim-enzim yang mengkatalisis pemindahan gugus satu karbon, residu aldehida atau keton, dan gugus yang mengandung asil, alkil, glikosil, fosfor atau sulfur. Beberapa subkelas penting adalah :

**Asiltransferase.**

Misalnya :

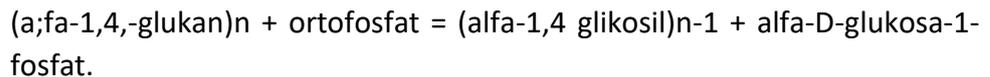
Asetil-KoA : kolin O-asetiltransferase [ kolin asiltrasferase].



**Glikosiltransferase.**

Misalnya :

alfa-1,4-glukan : ortofosfat glikosil transferase [fosforilase]



**Enzim-enzim yang mengkatalisis pemindahan gugus yang mengandung fosfat.**

Misalnya :

ATP : D-heksosa-6fosfotransferase [heksokinase]



**3. Hidrolase**

Merupakan kelompok enzim yang mengkatalisis reaksi hidrolisis. Enzim hidrolase, sebagai satu kelas khusus dari transferase dimana grup donor tertransfer ke air. Reaksi yang sama rata melibatkan pemotongan ikatan peptida.

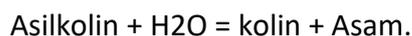
- a. *Esterase* : enzim yang memecah ikatan ester dengan cara hidrolisis
- b. *Lipase* : enzim yang memecah ikatan ester pada lemak sehingga terjadi asam lemak dan gliserol.
- c. *Fosfatase* : enzim yang dapat memecah ikatan fosfat pada suatu senyawa.
- d. *Amilase* : enzim yang dapat memecah ikatan-ikatan pada amilum sehingga terbentuk maltosa.
- e. *Proteolitik atau Protease atau Peptidase* : enzim yang bekerja sebagai katalis dalam reaksi pemecahan molekul protein dengan cara hidrolisis.

Enzim-enzim yang mengkatalisi hidrolisis ikatan-ikatan ester, eter, peptida, glikosil, anhidrida asam, C-C, C-halida, atau P-N. Misalnya :

**Enzim-enzim yang bekerja pada ikatan ester.**

Misalnya :

Asilkolin asil-hidrolase [pseudokolinesterase].



**Enzim-enzim yang bekerja pada senyawa glikosil.**

Misalnya :

beta-D-galaktosida galaktohidrolase [beta-galaktosida]



**Enzim-enzim yang bekerja pada ikatan peptida.**

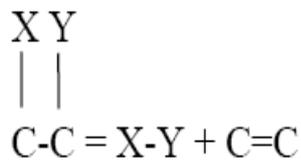
Nama-nama klasik (pepsin, plasmin, rennin, kimotripsin) masih banyak dipakai karena over lapping dan kespesifikan yang tidak menentu yang membuat tata-nama menurut sistem tidak praktis pada dewasa ini.

**4. Liase**

Enzim liase merupakan kelompok enzim yang mengkatalisis reaksi eliminasi non oksidasi dan non hidrolisis suatu gugus dari substrat sehingga terbentuk ikatan ganda. Enzim liase adalah enzim yang menambah atau menghilangkan unsur air, amonia atau CO<sub>2</sub>.

- a. *Dekarboksilase* menghilangkan unsur CO<sub>2</sub> dari asam keto alfa, beta atau asam amino.
- b. *Dehidratase* menghilangkan unsur H<sub>2</sub>O dalam sebuah reaksi dehidrasi. Dehidratase sitrat mengubah sitrat menjadi cis-akoninat.
- c. *Aldolase* bekerja pada reaksi pemecahan molekul fruktosa 1,6 difosfat menjadi dua molekul triosa yaitu dihidroksi aseton fosfat gliseraldehida-3-fosfat.
- d. *L malat hidroliase (fumarase)* yaitu enzim yang mengkatalisis reaksi pengambilan air dari malat sehingga dihasilkan fumarat.

Enzim-enzim yang mengkatalisis pembuangan gugus dari substrat dengan mekanisme yang lain dari pada hidrolisis, dan meninggalkan ikatan rangkap.



Yang termasuk golongan ini adalah enzim yang bekerja pada ikatan C-C, C-O, C-N, C-S, dan C-halida. Yang termasuk subkelasnya adalah :

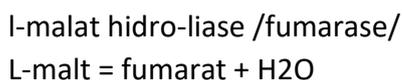
**Aldehida-liase.**

Misalnya :



**Karboks-oksigen liase.**

Misalnya :



**5. Isomerase**

Enzim isomerase merupakan kelompok enzim yang mengkatalisis reaksi pengubahan struktur molekul sehingga membentuk suatu isomer. Enzim isomerase, enzim dari kelompok yang sangat heterogen mengkatalisa isomerase beberapa jenis. Di antaranya cis-trans, keto-

enol dan interkonversi (perubahan bentuk) aldose-ketose. Isomerase yang mengkatalisa pembalikan karbon Asimetrik terjadi pada epimerase atau recemase. Mutase melibatkan transfer intramolekul pada suatu kelompok seperti fosforil. Transfer tidak perlu langsung, tapi dapat melibatkan suatu enzim fosforilated sebagai perantara. Hal ang termasuk kelas ini adalah semua enzim yang mengkatalisis interkonversi isomer-isomer optik, geometrik, atau posisi. Beberapa subkelasnya adalah :

**Rasemase dan epimerase. Misalnya :**

Alanin rasemase  
L-alanin + D-alanin

**Sis-trans isomerrase. Misalnya :**

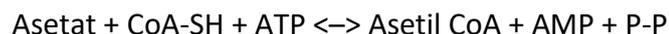
Semua trans-retinen 11-sistrans isomerase [retinen isomerase].  
Semuatrans-retinen = 11-sis-retinen.

**Enzim-enzim yang mengkatalisis interkonversi aldosa dan ketosa. Misalnya:**

D-gliseraldehida-3-fosfat ketol-isomerase [triosafosfat isomerase].  
D-Gliseraaldehida-3-fosfat = dihidroksiaseton fosfat

**6. Ligase (ligare = mengikat)**

Merupakan kelompok enzim yang mengkatalisis reaksi ligasi yaitu penggabungan 2 substrat. Reaksi ini disertai hidrolisis ATP sebagai sumber energi. Enzim ini mengkatalisis reaksi penggabungan 2 molekul dengan dibebaskannya molekul pirofosfat dari nukleosida trifosfat, sebagai contoh adalah enzim asetat=CoA-SH ligase yang mengkatalisis rekasi sebagai berikut:



Enzim Ligase, berarti mengikat, enzim- enzim ini terlibat dalam reaksi sintesa dimana 2 molekul bergabung pada pengeluaran sebuah ATP “Ikatan fosfat energi tinggi” kegunaan sintetase tersedia untuk grup khusus enzim. Pembentukan acyl amino tRNA bekerja coenzim A, glutamin dan tambahan CO<sub>2</sub> menjadi piruvat, adalah reaksi yang dikatalisa oleh enzim ligase. Contoh piruvat karboksilasi.

Enzim yang mengkatalisis penggabungan 2 senyawa diikuti oleh pemecahan ikatan pirofosfat pada ATP atau senyawa yang sejenis. Yang termasuk golongan ini adalah enzim-enzim yang mengkatalisis reaksi pembentukan ikatan C-O, C-S, C-N, dan C-C. Subkelasnya diwakili oleh :

**Enzim-enzim yang mengkatalisi pembentukan ikatan C-S.**

Misalnya :  
 Suksinat : KoA ligase (GDP) [suksinat tiokinase]  
 GTP + suksinat : KoA ligase (GDP) + Pi + suksinil

**Enzim-enzim yang mengkatalisis pembentukan ikatan C-N.**

Misalnya :  
 L-Glutamat : Amonia ligase (ADP) [Glutamin sintetase].  
 ATP + L-Glutamat + NH<sub>4</sub> = ADP + oriofosfat + L-Glutamin

**Enzim-enzim yang mengkatalisis pembentukan ikatan C-C.**

Misalnya :  
 Asetil-KoA : CO<sub>2</sub> ligase (ADP) [asetil-KoA karboksilase].  
 ATP + asetil-KoA + CO<sub>2</sub> = ADP + Pi + malonil- KoA

**D. KOMPONEN ENZIM**

Sebuah sistem kehidupan mengendalikan kegiatan melalui enzim. Enzim adalah molekul protein yang merupakan katalis biologis dengan tiga karakteristik. Pertama, fungsi dasar dari sebuah enzim adalah untuk meningkatkan laju reaksi. Kebanyakan reaksi seluler terjadi sekitar satu juta kali lebih cepat daripada mereka akan tanpa adanya enzim. Kedua, sebagian besar enzim bertindak secara khusus dengan hanya satu reaktan (disebut substrat) untuk menghasilkan produk. Ciri ketiga dan yang paling luar biasa adalah bahwa enzim diatur dari keadaan aktivitas rendah dengan aktivitas tinggi dan sebaliknya. Secara bertahap, Anda akan menghargai bahwa individualitas sel hidup adalah karena sebagian besar untuk set unik sekitar 3.000 enzim yang diprogram secara genetik untuk menghasilkan. Bahkan jika satu enzim saja hilang atau rusak, maka hasilnya bisa menjadi bencana.

Sebagian besar informasi tentang enzim telah dapat digambarkan, karena mereka dapat diisolasi dari sel dan dibuat untuk bekerja di lingkungan tabung reaksi. Pekerjaan yang luas juga telah dilakukan dengan teknik difraksi X-Ray untuk menjelaskan struktur tiga dimensi dari beberapa enzim.

Enzim (biokatalisator) adalah senyawa protein sederhana maupun protein kompleks yang bertindak sebagai katalisator spesifik. Enzim yang tersusun dari protein sederhana jika diuraikan hanya tersusun atas asam amino saja, misalnya pepsin, tripsin, dan kemotripsin. Sementara itu, enzim yang berupa protein kompleks bila diuraikan tersusun atas asam amino dan komponen lain.

Enzim lengkap atau sering disebut holoenzim, terdiri atas komponen protein dan nonprotein. Komponen protein yang menyusun enzim disebut apoenzim. Komponen ini mudah mengalami denaturasi, misalnya oleh pemanasan dengan suhu tinggi. Adapun penyusun enzim yang berupa komponen non-protein dapat berupa komponen organik dan anorganik.

Komponen organik yang terikat kuat oleh protein enzim disebut gugus prostetik, sedangkan komponen organik yang terikat lemah disebut koenzim. Beberapa contoh koenzim antara lain: vitamin (vitamin B1, B2, B6, niasin, dan biotin), NAD (nikotinamida adenin dinukleotida), dan koenzim A (turunan asam pentotenat).

Komponen anorganik yang terikat lemah pada protein enzim disebut kofaktor atau aktivator, misalnya beberapa ion logam seperti  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$ , dan  $Na^+$ .

Komponen penyusun enzim terdiri dari:

1. Apoenzim, yaitu bagian enzim aktif yang tersusun atas protein yang bersifat labil (mudah berubah) terhadap faktor lingkungan, dan
2. Kofaktor, yaitu komponen non protein yang berupa :
  - a. Ion-ion anorganik (aktivator)  
Berupa logam yang berikatan lemah dengan enzim, Fe, Ca, Mn, Zn, K, Co. Ion klorida, ion kalsium merupakan contoh ion anorganik yang membantu enzim amilase mencerna karbohidrat (amilum)
  - b. Gugus prostetik  
Berupa senyawa organik yang berikatan kuat dengan enzim, FAD (Flavin Adenin Dinucleotide), biotin, dan heme merupakan gugus prostetik yang mengandung zat besi berperan memberi kekuatan ekstra pada enzim terutama katalase, peroksidase, sitokrom oksidase.
  - c. Koenzim  
Berupa molekul organik non protein kompleks, seperti NAD (Nicotineamide Adenine Dinucleotide), koenzim-A, ATP, dan vitamin yang berperan dalam memindahkan gugus kimia, atom, atau elektron dari satu enzim ke enzim lain.

Enzim yang terikat dengan kofaktor disebut **holoenzim**.

Enzim diproduksi oleh sel-sel yang hidup, sebagian besar enzim bekerja di dalam sel dan disebut enzim intraseluler, contohnya enzim katalase yang berfungsi menguraikan senyawa peroksida ( $H_2O_2$ ) yang bersifat racun menjadi air ( $H_2O$ ) dan oksigen ( $O_2$ ). Enzim-enzim yang bekerja di luar sel (ekstraseluler) contohnya : amilase, lipase, protease dll.

Sifat enzim lain yang penting untuk diketahui adalah enzim merupakan protein yang tersusun atas asam-asam amino yang membentuk struktur tiga dimensi yang kompleks.

### 1. Protein Enzim

Struktur protein enzim juga terdiri dari struktur primer, sekunder, tertier, dan kuartener yang kesemuanya penting dalam aktivitas katalitik enzim.

Didalam sel protein enzim berlangsung ribuan reaksi kimia yang membuat sel dapat hidup, mengekstrasi energi dari lingkungan, merubah sumber energi menjadi molekul yang bermanfaat, memperbaiki dan membangun diri sendiri, melakukan pembuangan hasil samping, dan melakukan replikasi diri.

## 2. Koenzim

Banyak enzim hanya dapat bekerja (enzim mengkatalis reaksi-reaksi substratnya) jika terdapat suatu molekul organik nonprotein yang spesifik. Molekul organik itu disebut koenzim. Hanya bila enzim dan koenzim keduanya terdapat akan terjadi katalisis. Sistem komplit enzim dan koenzim disebut holoenzim, sedangkan bagian protein sistem tersebut dinamakan apoenzim. Jadi :



Jenis reaksi yang sering memerlukan partisipasi koenzim adalah oksidoreduksi, reaksi-reaksi pemindahan gugus dan somerasi, dan yang menghasilkan pembentukan ikatan kovalen (kelas 1, 2, 5, dan 6) sebaliknya, reaksi lisis, termasuk reaksi hidrolisis seperti yang dikatalis oleh enzim-enzim saluran pencernaan, tidak memerlukan koenzim (kelas 3 dan 4)

Seringkali vitamin golongan B-kompleks merupakan bagian struktur koenzim. Misalnya untuk metabolisme asam-asam amino diperlukan vitamin B6. Untuk oksidasi biologi diperlukan nikotinamida, tianin, riboflavin, asam pantotenat dan asam lipoat. Untuk metabolisme zat dengan satu atom C (C-1 unit) diperlukan asam folat dan vitamin B12.

Beberapa koenzim mempunyai struktur yang mirip dengan vitamin bahkan menjadi bagian dari molekul vitamin tersebut. Hubungan antara vitamin dengan koenzim tampak pada contoh berikut :

- a. Niasin, merupakan nama vitamin yang berupa molekul nikotinamida atau asam nikotinat. Molekul nikotinamida terdapat sebagai bagian dari molekul NAD<sup>+</sup>, NADP<sup>+</sup>. Kekurangan niasin akan mengakibatkan pellagra pada manusia.
- b. Molekul riboflavin atau vitamin B2 terdiri atas D ribitol yang terikat pada cincin isoaloksazon yang tersubstitusi. Vitamin ini dikenal sebagai faktor pertumbuhan. Molekul riboflavin merupakan bagian dari molekul FAD.
- c. Asam lipoat adalah suatu vitamin yang juga merupakan faktor pertumbuhan dan terdapat dalam hati. Asam ini terdapat dalam dua bentuk teroksidasi dan tereduksi, berfungsi sebagai kofaktor pada enzim piruvat dehidrogenase dan ketoglutarat dehidrogenase, berperan dalam reaksi pemisahan gugus akil.
- d. Biotin adalah vitamin yang terdapat dalam hati dan berikatan dengan suatu protein. Biotin berfungsi sebagai koenzim dalam reaksi karboksilasi.
- e. Tiamin atau vitamin B1 umumnya terdapat dalam keadaan bebas dalam beras atau gandum. Kekurangan vitamin B1 akan mengakibatkan penyakit beri-beri. Koenzim yang berasal dari vitamin B1 ialah tiaminifosfat (TPP) dan berperan dalam reaksi yang menggunakan enzim alpa keto dekarboksilase, asam alpa keto oksidase, transketolase dan fosfo ketolase.
- f. Vitamin B6 terdiri dari tiga senyawa yaitu piridoksal, piridoksin dan piridoksamin. Kekurangan vitamin B6 dapat mengakibatkan dermatitis (penyakit kulit) dan gangguan pada sistem saraf pusat. Koenzim dari vitamin B6 ialah piridoksalfosfat dan piridoksaminofosfat.

- g. Asam folat dan derivatnya terdapat banyak di alam. Bakteri dalam usus memproduksi asam fosfat dalam jumlah kecil. Koenzim yang berasal dari vitamin ini ialah asam tetrahidrofosfat (FH<sub>4</sub>). Peranan FH<sub>4</sub> ialah sebagai pembawa unit senyawa satu atom karbon yang berguna dalam biosintesis purin, serin dan glisin.
- h. Vitamin B<sub>12</sub> sebagaimana diisolasi dari hati adalah sianokobalamina. Fungsi vitamin B<sub>12</sub> adalah bekerja pada beberapa reaksi anatara lain reaksi pemecahan ikatan C-C, ikatan C-O, dan ikatan C-N dengan enzim mutase dan dehidrase.
- i. Asam pantotenat terdapat di alam sebagai komponen dalam molekul koenzim A. Vitamin ini diperlukan oleh tubuh sebagai faktor pertumbuhan. Koenzim A berperan penting sebagai pembawa gugus asetil, khususnya dalam biosintesis asam lemak.

Di samping koenzim yang mempunyai hubungan struktural dengan vitamin, ada pula koenzim yang tidak berhubungan dengan vitamin, yaitu adenosine trifosfat atau ATP. Koenzim ini termasuk golongan senyawa berenergi tinggi.

*Tabel 5.2*  
*Contoh-contoh koenzim dan peranannya*

No	Kode	Singkatan dari	Yang dipindahkan
1.	NAD	Nikotinamida-adenina dinukleotida	Hidrogen
2.	NADP	Nikotinamida-adenina dinukleotida fosfat	Hidrogen
3.	FMN	Flavin mononukleotida	Hidrogen
4.	FAD	Flavin-adenina dinukleotida	Hidrogen
5.	Ko-Q	Koenzim Q atau Quinon	Hidrogen
6.	sit	Sitokrom	Elektron
7.	Fd	Ferredoksin	Elektron
8.	ATP	Adenosina trifosfat	Gugus fosfat
9.	PAPS	Fosfoadenil sulfat	Gugus sulfat
10.	UDP	Uridina difosfat	Gula
11.	Biotin	Biotin	Karboksil (CO <sub>2</sub> )
12.	Ko-A	Koenzim A	Asetil
13.	TPP	Tiamin pirofosfat	C <sub>2</sub> -aldehida

### 3. Fungsi dan Cara Kerja Enzim

#### a. Fungsi Enzim

Fungsi suatu enzim ialah sebagai katalis untuk suatu proses biokimia yang terjadi dalam sel maupun di luar sel. Suatu enzim dapat mempercepat reaksi 10<sup>8</sup> sampai 10<sup>11</sup> kali lebih cepat daripada suatu reaksi tersebut dilakukan tanpa katalis. Jadi, enzim dapat berfungsi sebagai katalis yang sangat efisien, di samping mempunyai derajat kekhasan yang

tinggi. Oleh karena itu, enzim mempunyai peranan yang sangat penting dalam reaksi metabolisme. Peranan enzim dalam reaksi metabolisme adalah sebagai berikut:

- 1) Biokatalisator yaitu meningkatkan kecepatan reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasinya tetapi tidak ikut bereaksi.
- 2) Modulator yaitu mengatur reaksi yang bersifat acak menjadi berpola. Misalnya glukosa yang terbentuk selama proses fotosintesis. Jika konsentrasi glukosa telah melebihi keseimbangan, maka akan terurai menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Dengan adanya enzim, glukosa dapat diubah menjadi sukrosa atau amilum. Dalam bentuk sukrosa dapat diedarkan ke seluruh jaringan melalui floem dan disimpan dalam bentuk amilum. Dengan mengubah glukosa menjadi molekul lain, maka proses fotosintesis dapat terus berlangsung tidak terhambat oleh akumulasi hasilnya.

#### *b. Cara Kerja Enzim*

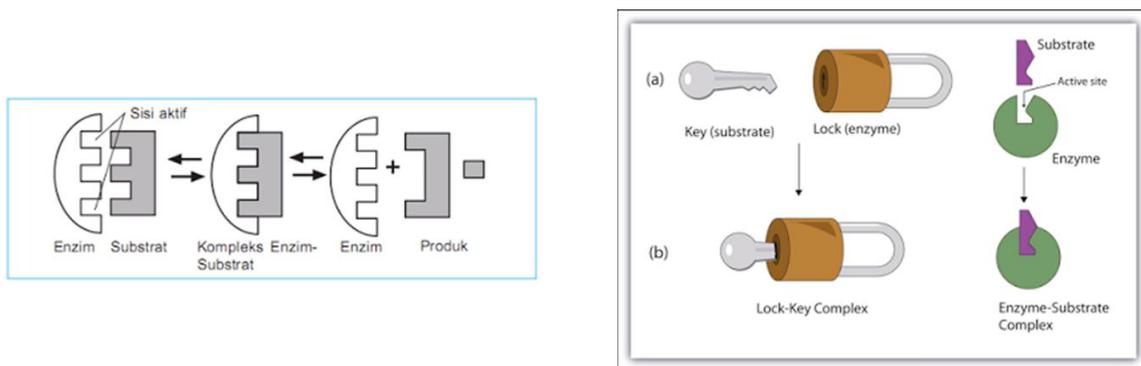
- Kompleks enzim substrat

Telah dijelaskan bahwa suatu enzim mempunyai kekhasan yaitu hanya bekerja pada satu reaksi saja. Untuk dapat bekerja terhadap suatu zat atau substrat harus ada hubungan atau kontak antara enzim dengan substrat. Oleh karena itu tidak seluruh bagian enzim dapat berhubungan dengan substrat. Hubungan antara substrat dengan enzim hanya terjadi pada bagian atau tempat tertentu saja. Tempat atau bagian enzim yang mengadakan hubungan atau kontak dengan substrat dinamai bagian aktif (active site). Hubungan hanya mungkin terjadi apabila bagian aktif mempunyai ruang yang tepat dapat menampung substrat. Apabila substrat mempunyai bentuk atau konformasi lain, maka tidak dapat ditampung pada bagian aktif suatu enzim. Dalam hal ini enzim itu tidak dapat berfungsi terhadap substrat. Ini adalah penjelasan mengapa tiap enzim mempunyai kekhasan terhadap substrat tertentu.

Hubungan atau kontak antara enzim dengan substrat menyebabkan terjadinya kompleks enzim-substrat. Kompleks ini merupakan kompleks yang aktif, yang bersifat sementara dan akan terurai lagi apabila reaksi yang diinginkan telah terjadi.

- 1) Lock and key (gembok dan kunci)

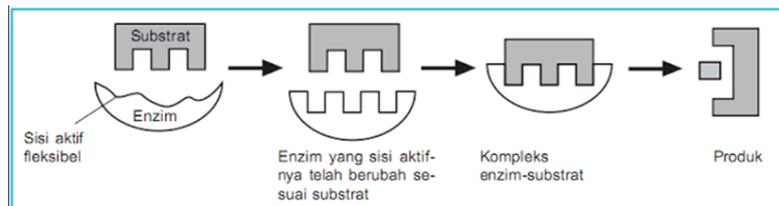
Menurut teori kunci-gembok, terjadinya reaksi antara substrat dengan enzim karena adanya kesesuaian bentuk ruang antara substrat dengan situs aktif (active site) dari enzim, sehingga sisi aktif enzim cenderung kaku. Substrat berperan sebagai kunci masuk ke dalam situs aktif, yang berperan sebagai gembok, sehingga terjadi kompleks enzim-substrat. Pada saat ikatan kompleks enzim-substrat terputus, produk hasil reaksi akan dilepas dan enzim akan kembali pada konfigurasi semula. Berbeda dengan teori kunci gembok. Jika enzim mengalami denaturasi (rusak) karena panas, maka bentuk sisi aktif berubah sehingga substrat tidak sesuai lagi.



Gambar 5.6 Lock dan Key

2) Teori Kecocokan Induksi (Daniel Koshland)

Menurut teori kecocokan induksi reaksi antara enzim dengan substrat berlangsung karena adanya induksi substrat terhadap situs aktif enzim sedemikian rupa sehingga keduanya merupakan struktur yang komplemen atau saling melengkapi. Menurut teori ini situs aktif tidak bersifat kaku, tetapi lebih fleksibel.



Gambar 5.7 Teori Kecocokan Induksi

4. Regulasi Enzim

Seperti halnya katalisator, enzim dapat mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasi. Enzim tersebut akan bergabung sementara dengan reaktan sehingga mencapai keadaan transisi dengan energi aktivasi yang lebih rendah daripada energi aktivasi yang diperlukan untuk mencapai keadaan transisi tanpa bantuan katalisator atau enzim.

Enzim bekerja dengan regulasi tertentu. Regulasi enzim itu sendiri dilakukan dengan dua cara yaitu:

a. Secara Mekanisme umpan balik

Mekanisme umpan balik membantu regulasi aliran metabolit bolak-balik (reversible) jangka pendek ketika berespons terhadap sinyal-sinyal fisiologi spesifik. Bekerja tanpa mengubah ekspresi gen. Mekanisme umpan balik juga bekerja pada enzim awal dalam rangkaian proses metabolik yang panjang (acapkali biosintetik), dan lebih bekerja pada tapak alosterik dibandingkan tapak katalitik. Inhibisi umpan balik melibatkan satu protein tunggal dan tidak memiliki sifat hormonal serta neural. Sebaliknya, regulasi enzim mamalia oleh

fosforilasi-defosforilasi melibatkan beberapa protein serta ATP dan berada dibawah kontrol hormonal serta neural langsung.

*b. Pengendalian genetik melalui sintesis protein dalam sel*

ADN sebagai bahan genetik mengendalikan sifat individu melalui proses sintesis protein. Ada dua kelompok protein yang dibuat ADN, yaitu protein struktural dan protein katalis. Protein struktural akan membentuk sel, jaringan, dan organ hingga penampakan fisik suatu individu. Inilah yang menyebabkan ciri fisik tiap orang berbeda satu sama lain. Protein katalis akan membentuk enzim dan hormon yang berpengaruh besar terhadap proses metabolisme, dan akhirnya berpengaruh terhadap sifat psikis, emosi, kepribadian, atau kecerdasan seseorang.

Kinetika reaksi yang cepat, itulah kelebihan dari enzim. Namun kecepatan ini juga harus dikoordinasikan sedemikian rupa agar enzim yang bersangkutan tidak berada di jalan yang salah.

Terdapat tiga jenis pengaturan enzim yaitu:

1) Induksi-Represi Mekanisme

Ini merupakan regulasi yang ditujukan pada pangkalnya, yaitu pada tingkat DNA. Seperti yang sudah ditinjau sebelumnya bahwa enzim merupakan protein yang disintesis berdasarkan kode genetik yang terdapat pada DNA. Regulasi pada DNA ini pada akhirnya akan meregulasi sintesis enzim yang bersangkutan. Apabila sintesis enzim di-represi, maka artinya sedikit kerja. Sebaliknya apabila diinduksi, maka sintesis enzim akan dipercepat sehingga enzim akan banyak tersedia

2) Regulasi Alosterik

Regulasi ini dilakukan oleh suatu senyawa kimia lain yang bukan merupakan substrat bagi enzim. Senyawa kimia ini, yang diistilahkan sebagai 'aktivator/inhibitor alosterik' dapat merubah bentukan 3-dimensi enzim sedemikian rupa sehingga enzim tersebut pada akhirnya akan bekerja lebih cepat atau lebih lambat. Perumusan kerja untuk model enzim alosterik dibuat oleh Monod, Wyman, dan Changeux. Model untuk kerja enzim yang seperti itu selanjutnya dikenal sebagai 'cooperativity' atau juga model MWC.

3) Fosforilasi Enzim

Disini kita akan melihat enzim mengkatalisis enzim, tepatnya dalam reaksi fosforilasi atau mengikatkan gugus fosfat pada suatu enzim. Sebagian besar enzim di dalam tubuh kita kerjanya sangat terpengaruh dengan apa yang disebut sebagai kesetimbangan substrat-produk. Enzim memang dapat mempercepat reaksi perubahan substrat menjadi produk, namun tidak kuasa untuk mengubah proporsi alamiah dari keberadaan substrat-produk. Inilah kesetimbangan, suatu nilai tetap proporsi campuran substrat dengan produk. .

## 5. Sumber Enzim

Enzim ialah senyawa protein yang disintesis di dalam sel secara biokimiawi. Enzim merupakan biokatalis yaitu senyawa yang diproduksi oleh organisme. Secara garis besar sumber enzim dapat digolongkan menjadi tiga, yaitu hewan, tanaman dan mikroba. Namun saat ini, enzim yang diproduksi dalam skala industri sebagian besar diperoleh dari mikroba.

*Tabel 5.3  
Beberapa enzim penting yang berasal dari hewan*

Enzim	Sumber	Skala Produksi	Industri Pengguna
Katalase	Hati	<>	Makanan
Kemotripsin	Pankreas	<>	Kulit
Lipase	Pankreas	<>	Makanan
Rennet	Abomasums	>1 ton /tahun	Keju
Tripsin	Pankreas	<>	Kulit

*Tabel 5.4  
Beberapa enzim penting yang berasal dari tumbuhan*

	Sumber	Skala Produksi	Industri Pengguna
Aktinidin	Buah kiwi	<>	Makanan
$\alpha$ – amilase	Kecambah barley	> 100 ton / tahun	Bir
$\beta$ – amilase	Kecambah barley	> 100 ton / tahun	Bir
Bromelin	Getah nanas	<>	Bir
$\beta$ – glukonase	Kecambah barley	> 10 ton / tahun	Bir
Hicin	Getah hg	<>	Makanan
Lipoksigenase	Kacang kedelai	<>	Makanan

## 6. Isolasi Enzim dan Pemurnian Enzim

Enzim dapat diisolasi secara ekstraseluler dan intraseluler. Enzim ekstraseluler merupakan enzim yang bekerja di luar sel, sedangkan enzim intraseluler merupakan enzim yang bekerja di dalam sel. Ekstraksi enzim ekstraseluler lebih mudah dibandingkan ekstraksi enzim intraseluler, karena tidak memerlukan pemecahan sel dan enzim yang dikeluarkan dari sel mudah dipisahkan dari pengotor lain serta tidak banyak bercampur dengan bahan-bahan sel lain.

a. *Sentrifugasi*

Sentrifugasi merupakan tahap awal pemurnian enzim. Metode ini digunakan untuk memisahkan enzim ekstraseluler dari sisa-sisa sel. Sentrifugasi akan menghasilkan supernatan yang jernih dan endapan yang terikat kuat pada dasar tabung, yang kemudian dipisahkan secara normal. Sel-sel mikroba biasanya mengalami sedimentasi pada kecepatan 5000 selama 15 menit, prinsip sentrifugasi berdasarkan pada kenyataan bahwa setiap partikel yang berputar pada laju sudut yang konstan akan memperoleh gaya keluar (F). Besar gaya ini bergantung pada laju sudut  $\omega$  (radian/detik) dan radius pertukarannya (sentimeter).

b. *Fraksinasi dengan ammonium sulfat Presipitasi*

Merupakan proses penambahan senyawa yang dapat menggumpalkan dan memisahkan protein dari bahan lain sehingga didapatkan protein yang lebih murni. Presipitasi protein merupakan metode yang berguna untuk pemekatan protein dan sering dilakukan pada tahap awal dari pemurnian enzim. Presipitasi protein dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain perubahan pH, penambahan pelarut organik dan penambahan garam. Pemekatan protein dengan penambahan garam ke dalam larutan enzim merupakan cara yang banyak dilakukan. Garam yang dapat digunakan berupa natrium klorida, natrium sulfat, atau ammonium sulfat. Ammonium sulfat lebih sering digunakan karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan garam-garam yang lain, yaitu mempunyai kelarutan yang tinggi, tidak mempengaruhi aktivitas enzim, mempunyai daya pengendapan yang efektif, mempunyai efek penstabil terhadap kebanyakan enzim, dapat digunakan pada berbagai pH dan harganya murah. Penambahan garam pada konsentrasi tinggi akan menurunkan kelarutan protein. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan muatan listrik di sekitar protein yang akan menarik molekul-molekul air dari protein. Interaksi hidrofobik sesama molekul protein pada suasana ionik tinggi akan menyebabkan pengendapan protein, yang disebut *salting out*. Protein yang hidrofobitasnya tinggi akan mengendap lebih dahulu, sedangkan protein yang memiliki sedikit residu non polar akan tetap larut meskipun pada konsentrasi garam yang paling tinggi

c. *Dialisis*

Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kemurnian enzim adalah dialisis. Prinsip dialisis yaitu memisahkan molekul-molekul besar dari molekul-molekul kecil dengan bantuan membran semipermeable. Dialisis berfungsi untuk memisahkan garam-garam anorganik agar tidak mengganggu tahap pemurnian enzim selanjutnya. Dialisis dapat dilakukan dengan menggunakan kantong selofan, kantong ini memiliki ukuran pori-pori yang lebih kecil dari ukuran protein sehingga protein tidak dapat keluar dari kantong selofan. Penggunaan kantong selofan memiliki beberapa keuntungan yaitu mudah digunakan, memiliki harga yang relatif murah dan mudah didapatkan. Proses dialisis berlangsung karena adanya perbedaan konsentrasi zat terlarut di dalam dan di luar membran. Difusi zat terlarut bergantung pada suhu dan viskositas larutan. Meskipun suhu tinggi dapat meningkatkan laju difusi, namun sebagian besar protein dan enzim stabil pada suhu 4-8°C sehingga dialisis harus dilakukan di dalam ruang dingin. Pada proses dialisis, larutan enzim dimasukkan ke

dalam kantung dialisis yang terbuat dari membran semipermeable (selofan). Jika kantung yang berisi larutan enzim dimasukkan ke dalam larutan buffer, maka molekul protein kecil yang ada di dalam larutan protein atau enzim seperti garam anorganik akan keluar melewati pori-pori membran, sedangkan molekul enzim yang berukuran besar tetap tertahan dalam kantung dialisis. Keluarnya molekul menyebabkan distribusi ion-ion yang ada di dalam dan di luar kantung dialisis tidak seimbang. Untuk memperkecil pengaruh ini digunakan larutan buffer dengan konsentrasi rendah di luar kantung dialisis. Setelah tercapai keseimbangan, larutan diluar kantung dialisis dapat dikurangi. Proses ini dapat dilakukan secara kontinu sampai ion-ion di dalam kantung dialisis dapat diabaikan.

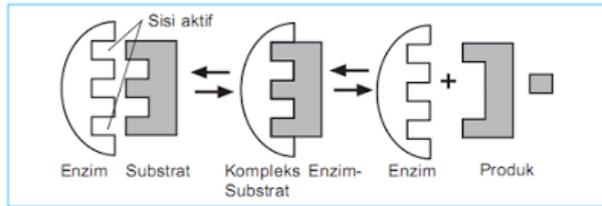
## LATIHAN

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

- 1) Sebutkan dan jelas sub kelas dari enzim oksidoreduktase !
- 2) Jelaskan dan gambarkan cara kerja enzim !
- 3) Sebutkan beberapa enzim yang dapat diperoleh dari hewan dan tumbuhan!

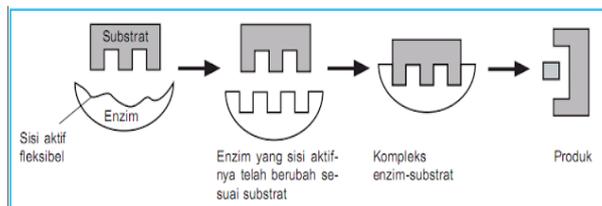
### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Kelas dari enzim oksidoreduktase meliputi:
  - a) Oksidase, memindahkan 2 elektron dari donor ke oksigen, biasanya menyebabkan pembentukan peroksida hidrogen,
  - b) Oksigenase, mengkatalisa penggabungan ke dua atom oksigen kedalam suatu substrat tunggal.
  - c) Hidroksilase, menggabungkan sebuah atom molekul oksigen kedalam substrat; oksigen yang kedua timbul seperti air.
  - d) Peroksidase, mempergunakan peroksida hidrogen selain dari oksigen sebagai oksidan, peroksida NADH mengkatalisa reaksi
  - e) Katalase, unik didalam peroksida hidrogen kerja baik sebagai donor maupun akseptor. Katalase berfungsi didalam sel untuk mendetoksifikasikan peroksida hidrogen.
- 2) Cara kerja enzim dapat digambarkan sebagai berikut.
  - a) Lock and key (gembok dan kunci)  
Menurut teori kunci-gembok, terjadinya reaksi antara substrat dengan enzim karena adanya kesesuaian bentuk ruang antara substrat dengan situs aktif (active site) dari enzim, sehingga sisi aktif enzim cenderung kaku. Substrat berperan sebagai kunci masuk ke dalam situs aktif, yang berperan sebagai gembok, sehingga terjadi kompleks enzim-substrat.



b) Teori Kecocokan Induksi (Daniel Koshland)

Menurut teori kecocokan induksi reaksi antara enzim dengan substrat berlangsung karena adanya induksi substrat terhadap situs aktif enzim sedemikian rupa sehingga keduanya merupakan struktur yang komplemen atau saling melengkapi. Menurut teori ini situs aktif tidak bersifat kaku, tetapi lebih fleksibel.



3) Beberapa enzim yang dihasilkan hewan dan tumbuhan antara lain adalah:

**SUMBER HEWANI**

Enzim	Sumber	Skala Produksi	Industri Pengguna
Katalase	Hati	<>	Makanan
Kemotripsin	Pankreas	<>	Kulit
Lipase	Pankreas	<>	Makanan
Rennet	Abomasums	>1 ton /tahun	Keju
Tripsin	Pankreas	<>	Kulit

**SUMBER TANAMAN**

Enzim	Sumber	Skala Produksi	Industri Pengguna
Aktinidin	Buah kiwi	<>	makanan
$\alpha$ –amilase	Kecambah barley	> 100 ton / tahun	bir
$\beta$ –amilse	Kecambah barley	> 100 ton / tahun	bir
Bromelin	Getah nanas	<>	bir
$\beta$ – glukonase	Kecambah barley	> 10 ton / tahun	bir
Hicin	Getah hg	<>	makanan
Lipoksigenase	Kacang kedelai	<>	makanan

## RINGKASAN

Enzim adalah protein yang berfungsi sebagai katalisator untuk reaksi-reaksi kimia didalam sistem biologi. Katalisator mempercepat reaksi kimia. Walaupun katalisator ikut serta dalam reaksi, ia kembali ke keadaan semula bila reeaksi telah selesai. Seperti halnya katalisator, enzim dapat mempercepat reaksi kimia dengan menurunkan energi aktivasinya.

Perubahan suhu dan pH mempunyai pengaruh besar terhadap kerja enzim. Kecepatan reaksi enzim juga dipengaruhi oleh konsentrasi enzim dan konsentrasi substrat. Pengaruh aktivator, inhibitor, koenzim dan konsentrasi elektrolit dalam beberapa keadaan juga merupakan faktor-faktor yang penting. Hasil rekasi enzim juga dapat menghambat kecepatan reaksi.

Fungsi suatu enzim ialah sebagai katalis untuk suatu proses biokimia yang terjadi dalam sel maupun di luar sel. Suatu enzim dapat mempercepat reaksi 10<sup>8</sup> sampai 10<sup>11</sup> kali lebih cepat daripada suatu reaksi tersebut dilakukan tanpa katalis.

Enzim mempunyai kekhasan yaitu hanya bekerja pada satu reaksi saja. Untuk dapat bekerja terhadap suatu zat atau substrat harus ada hubungan atau kontak antara enzim dengan substrat.Oleh karena itu tidak seluruh bagian enzim dapat berhubungan dengan substrat.Hubungan antara substrat dengan enzim hanya terjadi pada bagian atau tempat tertentu saja.Tempat atau bagian enzim yang mengadakan hubungan atau kontak dengan substrat dinamai bagian aktif (active site).Hubungan hanya mungkin terjadi apabila bagian aktif mempunyai ruang yang tepat dapat menampung substrat. Apabila substrat mempunyai bentuk atau konformasi lain, maka tidak dapat ditampung pada bagian aktif suatu enzim. Dalam hal ini enzim itu tidak dapat berfungsi terhadap substrat.Ini adalah penjelasan mengapa tiap enzim mempunyai kekhasan terhadap substrat tertentu.Secara tradisional tripsin dan lipase pankreas diperoleh dari sumber hewani.Tanaman juga merupakan sumber enzim.Beberapa protein biasa diperoleh dari getah pepaya, nanas dan tumbuhan lainnya.Selain itu, kecambah barley juga sering digunakan sebagai sumber enzim.

## TES 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Sebagian besar enzim didalam tubuh akan menunjukkan aktivitas optimum antara pH :
  - A. 1 – 3
  - B. 4
  - C. 5 – 9
  - D. 10 – 12

- 2) Faktor – faktor berikut yang tidak dapat mempengaruhi kecepatan reaksi enzimatik adalah :
- A. Suhu
  - B. pH
  - C. Konstanta keseimbangan reaksi
  - D. Inhibitor
- 3) Yang manakah diantara enzim dibawah ini yang mengkatalis reaksi berikut:  
**Asetat + CoA-SH + ATP  $\leftrightarrow$  Asetil CoA + AMP + P-P**
- A. Dekarboksilase
  - B. Asetat
  - C. Transfarase
  - D. Hidrolase
- 4) Enzim yang memecah ikatan ester dengan cara hidrolisis :
- A. Lipase
  - B. Amilase
  - C. Esterase
  - D. Protease
- 5) Enzim yang dapat memecah ikatan-ikatan pada amilum sehingga terbentuk maltosa adalah :
- A. Lipase
  - B. Amilase
  - C. Esterase
  - D. Protease
- 6) Enzim yang memecah ikatan ester pada lemak sehingga terjadi asam lemak dan gliserol:
- A. Lipase
  - B. Amilase
  - C. Esterase
  - D. Protease
- 7) Enzim yang memerlukan ion logam sebagai kofaktornya dinamakan :
- A. Holoenzim
  - B. Metaloenzim
  - C. Koenzim
  - D. Isoenzim

- 8) Peningkatan jumlah tripsinogen I (salah satu isozim dari tripsin) hingga 400x menunjukkan adanya :
- A. Hepatitis
  - B. Pankreasitis akut
  - C. Penyumbatan darah
  - D. Asam urat
- 9) Uricase yang berasal dari jamur *Candida utilis* dan bakteri *Arthobacter globiformis* dapat digunakan untuk mengukur :
- A. Tekanan darah
  - B. Glukosa dalam darah
  - C. Asam urat
  - D. Kolesterol
- 10) Enzim yang lazim digunakan dalam teknik EMIT (*Enzim Multiplied Immunochemistry Test*) adalah :
- A. lisozim
  - B. Amilase
  - C. Esterase
  - D. Protease

## Topik 2

### Peranan Enzim dalam Proses Metabolisme

Enzim bekerja mengkatalisis suatu reaksi dengan menurunkan energi aktivasi dari reaksi tersebut. Energi aktivasi adalah energi yang diperlukan untuk membentuk kompleks substrat-enzim yang kompeten untuk membentuk produk atau hasil reaksi.

Enzim merupakan senyawa protein dengan berat molekul sekitar 10.000 sampai dengan 2.000.000. D. Sebagian besar enzim dalam molekulnya memiliki bagian-bagian yang bukan merupakan polipeptida yang biasa memegang peran penting dalam mekanisme kerja enzim. Bagian bukan enzim ini disebut kofaktor, sedangkan bagian enzim yang merupakan rantai polipeptida disebut apoenzim. Keseluruhan molekul enzim yaitu meliputi apoenzim dan kofaktor disebut holoenzim.

Kofaktor dapat dibedakan menjadi tiga macam yaitu koenzim, gugus prostetik dan aktivator ion logam. Koenzim adalah senyawa-senyawa non-protein yang dapat terdialisa, termostabil dan terikat secara longgar dengan bagian protein dari enzim(apoenzim). Karena terikat secara longgar dan reversibel, kadang-kadang koenzim disebut juga ko-substrat. Umumnya koenzim merupakan vitamin atau turunannya antara lain vitamin B1, B2, B5, B6, B12 dan nikotinamida.

Dalam mekanisme kerja enzim, koenzim biasanya berperan sebagai pentransfer gugus kimia tertentu dari satu reaktan ke reaktan lainnya. Gugus kimia yang ditransferkan dapat berupa gugus sederhana ( $H+2e$ ) yang dibawa oleh NAD atau  $H^+$  yang dibawa oleh FAD, namun dapat juga berupa gugus kompleks, misalnya gugus amin ( $-NH_2$ ) yang dibawa oleh piridoksal fosfat.

Ada 4 mekanisme katalisis yang mungkin terjadi yaitu:

1. Katalisis melalui tegangan ikatan (*bond strain*): dalam mekanisme katalisis ini, penyusunan ulang struktur yang berlangsung dengan terikatnya substrat dan enzim akan menghasilkan ikatan substrat bertegangan tinggi yang lebih mudah mencapai keadaan bentuk peralihan atau *transition state*.
2. Katalisis melalui proksimitas dan orientasi: interaksi enzim-substrat akan mengorientasikan gugus reaktif dan membawa gugus-gugus ini mendekat satu sama lain. Kedekatan proksimitas) dan orientasi ini akan memudahkan terjadinya reaksi.
3. Katalisis melibatkan donor proton(asam) dan akseptor(basa): mekanisme lain yang juga dapat membantu terjadinya katalisis adalah penggunaan asam sebagai donor proton.
4. Katalisis kovalen: Substrat diorientasikan ke situs aktif enzim dengan cara sedemikian rupa sehingga terbentuk kompleks antara enzim atau koenzim dengan substrat yang terikat secara kovalen.

## A. MACAM-MACAM ENZIM BERDASARKAN PROSES METABOLISME ATAU TIPE REAKSI KIMIA YANG DIKATALIS

- Enzim katalase adalah enzim yang berfungsi dalam membantu mengubah altose peroksida menjadi  $H_2O$  (air) dan  $O_2$  (Oksigen)
- Enzim oksidase adalah enzim yang berfungsi mempercepat penggabungan oksigen ( $O_2$ ) pada substrat tertentu yang disaat bersamaan juga mereduksikan oksigen ( $O_2$ ), sehingga membentuk air ( $H_2O$ ).
- Enzim hidrase adalah enzim yang berfungsi menambah atau mengurangi air ( $H_2O$ ) dari senyawa tertentu tanpa menyebabkan terurainya senyawa yang bersangkutan. Contohnya : akonitase, fumarase, dan enolase.
- Enzim altose nase adalah enzim yang berfungsi dalam memindahkan altose dari suatu zat ke zat yang lainnya.
- Enzim transphosforilase adalah enzim yang berfungsi dalam memindahkan  $H_3PO_4$  dari molekul satu ke molekul yang lainnya yang dibantu oleh ion  $Mg^{2+}$ .
- Enzim karbosilase adalah enzim yang berfungsi dalam mengubah asam altose secara bolak balik. Contohnya : mengubah asam piruvat menjadi asetaldehida yang dibantu oleh karbosilase piruvat
- Enzim desmolase adalah enzim yang berfungsi dalam membantu pemindahan /penggabungan ikatan karbon. Contoh : aldolase diubah dalam pemecahan fruktosa menjadi gliseraldehida dan dehidroksiaseton
- Enzim peroksida adalah enzim yang berfungsi dalam membantu oksidasi senyawa fenolat, sedangkan dari oksigen yang digunakan, diambil dari  $H_2O_2$ .

### 1. Macam-Macam Enzim Berdasarkan Penggolongannya

#### a. Golongan Enzim Karbohidrat

- Enzim Amilase adalah enzim yang berperan mengubah amilum/polisakarida menjadi senyawa altose yaitu senyawa disakarida
- Enzim Sukrase adalah enzim yang berperan mengubah sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa
- Enzim Laktosa adalah enzim yang berperan mengubah senyawa laktosa menjadi glukosa dan galaktosa
- Enzim Maltosa adalah enzim yang berperan dan berfungsi mengurai altose menjadi senyawa glukosa
- Enzim Selulosa adalah enzim yang berperan mengurai selulosa/polisakarida menjadi senyawa selabiosa atau disakarida
- Enzim Pektinase adalah enzim yang berperan atau berfungsi mengubah petin menjadi senyawa asam altos

*b. Golongan Enzim Protase*

- Enzim tripsin adalah enzim yang berfungsi mengurai pepton menjadi senyawa asam amino
- Enzim peptidase adalah enzim yang berfungsi dalam mengurangi senyawa peptide menjadi senyawa asam amino
- Enzim renin adalah enzim yang berfungsi dalam mengurangi senyawa kasein dan susu
- Enzim galaktase adalah enzim yang berperan mengurai senyawa gelatin
- Enzim entrokinase adalah enzim yang berfungsi dalam mengurai senyawa pepton menjadi sentawa asam amino
- Enzim pepsin adalah enzim yang berperan dalam memecah senyawa protein menjadi asam amino

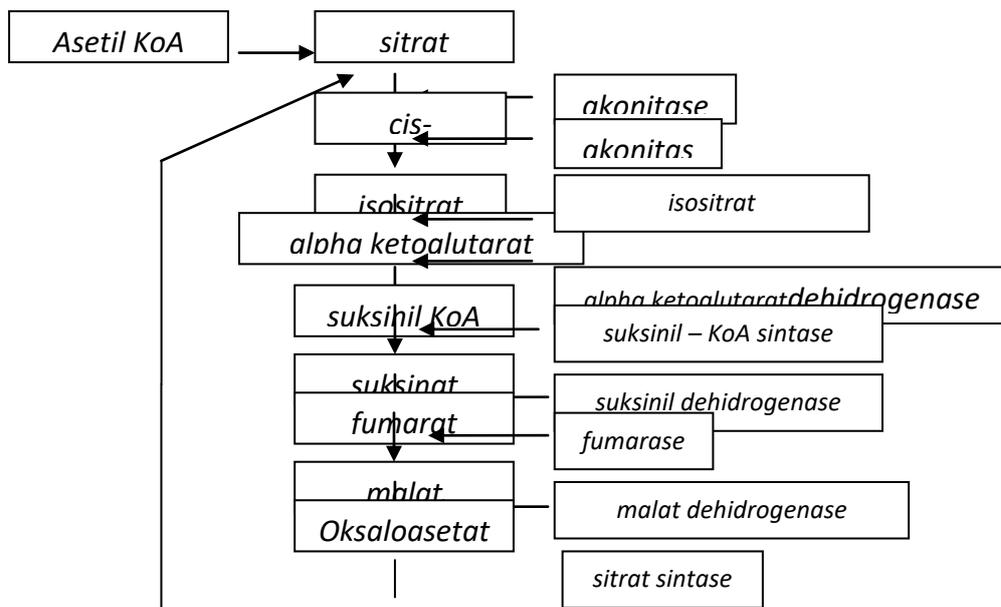
*c. Golongan Enzim Ekterase*

- Enzim lipase adalah enzim yang berperan atau berfungsi dalam mengurangi lemak menjadi senyawa gliserol dan juga asam lemak.
- Enzim fostatase adalah enzim yang berfungsi dalam mengurangi ester dan mendorong pelepasan asam fosfor.

**2. Enzim – enzim yang bekerja dalam Siklus Krebs**

Siklus Krebs disebut juga siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat. jalur biokimia ini berlangsung di dalam mitokondria. Senyawa yang menjadi substrat dalam jalur ini adalah asetil KoA yang antara lain berasal dari hasil dekarboksilasi oksidatif asam piruvat.

Asetil Koenzim A tidak hanya dihasilkan dari jalur katabolisme karbohidrat, melainkan juga merupakan produk katabolisme lipid dan senyawa–senyawa lainnya. Asetil KoA memasuki Siklus Krebs dengan jalan berekasi dengan asam oksaloasetat membentuk asam sitrat. Pada akhir siklus, asam oksaloasetat akan dibentuk kembali. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa dalam Siklus Krebs yang terjadi adalah oksidasi asetil KoA menjadi CO<sub>2</sub>. Di bawah ini adalah skematik dari siklus krebs.



Dari skematik di atas dapat dilihat bahwa secara keseluruhan siklus krebs terdiri dari delapan langkah reaksi, yang masing-masing dikatalisis oleh enzim-enzim yang spesifik sebagaimana di sajikan dalam diagram di bawah ini.

Transport asam lemak ke dalam matriks mitokondria dengan bantuan enzim karnitin. Transport asam lemak ke dalam mitokondria berlangsung melalui tiga tahap. Reaksi tahap pertama adalah aktivasi asam lemak menjadi asil-KoA. Reaksi ini berlangsung di sitosol, dikatalisis oleh enzim asil-KoA sintetase yang berada di sitosol luar mitokondria.



Asil-KoA yang terbentuk ini dapat melintasi membrane luar mitokondria masuk ke dalam ruang antar membrane, namun tidak dapat melintasi membrane dalam mitokondria. Enzim Karnitin-asil transferase I akan mengubah asil-KoA menjadi asil-karnitin yang dapat melintasi membrane dalam mitokondria. Enzim ini terdapat pada permukaan dalam dari membrane luar mitokondria.



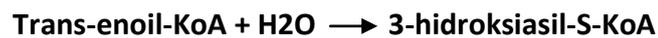
Dengan bantuan karnitin-asilkarnitin translokase yang terdapat di membrane dalam mitokondria, asil karnitin di transportkan ke dalam matriks mitokondria. Di dalam matriks mitokondria, asil karnitin diubah kembali menjadi asil KoA oleh enzim karnitin asil transferase II yang terdapat di permukaan dalam dari membrane dalam mitokondria.



Selanjutnya asil-KoA yang sudah berada di dalam matriks mitokondria akan mengalami oksidasi beta. Oksidase beta berlangsung dalam empat tahap, tahap pertama adalah dehidrogenasi asil-KoA oleh enzim asil-KoA aliose nase. Enzi ini mengandung FAD sebagai gugus prostetikny, yang berperan sebagai akseptor proton.



Tahap kedua adalah reaksi hidrasi yang dikatalisir oleh enzim enoil-KoA hidratase.



Tahap ketiga adalah reaksi dehidrogenasi 3-hidroksiasil-S-KoA menjadi 3-Ketoasil-S-KoA.



Tahap keempat adalah pengeluaran satu molekul asetil KoA dari 3-ketoasil-S-KoA. Reaksi pemecahan ini dikatalisir oleh enzim asetil-KoA asetil transferase atau yang lebih umum dikenal sebagai enzim tiolase.



Dengan dilepaskannya 1 molekul asetil KoA, maka senyawa 3-ketoasil-S-KoA yang dihasilkan dalam reaksi tahap empat ini jumlah atom C nya sudah berkurang dua buah dibandingkan senyawa 3-ketoasil-S-KoA semula. Setelah satu kali putaran yang terdiri dari 4 reaksi di atas, maka 3-ketoasil-S-KoA yang baru terbentuk kembali akan mengalami oksidasi dengan tahap – tahap reaksi yang sama, menghasilkan 1 molekul asetil KoA dan 1 molekul 3-ketoasil-S-KoA yang sudah berkurang lagi atom C nya sebanyak 2 buah. Demikian seterusnya reaksi oksidasi beta ini terjadi berulang kali sesuai dengan panjang rantai atom C dalam asam lemak, sampai seluruh rantai asil teroksidasi menjadi asetil KoA.

### 3. Peran enzim dalam pencernaan makanan

Sistem pencernaan merupakan sistem organ yang terdapat dalam tubuh yang berfungsi mencerna bahan makanan dengan mengkonversi ke bentuk senyawa atau molekul-molekul yang lebih sederhana agar dapat diserap oleh tubuh.

Sistem pencernaan manusia terdiri dari saluran pencernaan dan kelenjar pencernaan. Saluran pencernaan merupakan alat yang dilalui oleh bahan makanan. Sedangkan kelenjar pencernaan adalah bagian yang menghasilkan enzim untuk membantu mencerna makanan. Saluran pencernaan meliputi: mulut, kerongkongan atau altose, lambung, usus halus, dan usus besar. Kelenjar pencernaan antara lain terdapat di dinding lambung, dinding usus,

altose dan hati. Sedangkan kelenjar pencernaan terdiri dari kelenjar ludah, kelenjar lambung, kelenjar usus, hati, dan altose .

Bahan makanan yang masuk ke dalam tubuh akan diproses secara kimiawi oleh sistem pencernaan tubuh. Proses kimia ini dilakukan dengan menggunakan bahan kimia yang disebut enzim. Proses pencernaan kimiawi adalah proses perubahan susunan molekul makanan dengan bantuan kerja enzim. Enzim yang digunakan selama pencernaan kimiawi dihasilkan oleh kelenjar pencernaan.

Enzim adalah biomolekul berupa protein yang berfungsi sebagai senyawa katalis yang dapat mempercepat proses reaksi tanpa habis bereaksi dalam suatu reaksi kimia. Dengan bantuan enzim, bahan makanan dicerna menjadi bahan lain yang lebih sederhana dan mudah diserap oleh tubuh untuk selanjutnya menjadi sari makanan yang akan diedarkan oleh darah ke seluruh tubuh.

Fungsi/peran Enzim dalam proses pencernaan secara kimiawi di dalam tubuh manusia dapat dilihat pada 235alfo di bawah.

No	Lokasi	Enzim	Substrat	Hasil
1	Kelenjar ludah	Amylase/Ptialin	Amilum, Glikogen	Disakarida, Maltosa
2	Lambung	Pepsin, Rennin	Protein	Pepton
3	Usus halus	Peptidase	Polipeptida rantai pendek	Asam Amino
		Nuklease	DNA, RNA	Gula, Basa Asam Nukleat
		Lactase, Maltase	Disakarida	Monosakarida
		Sukrase		
4	Pancreas	Lipase	Trigliserida	Asam lemak, Gliserol
		Tripsin, Kimotripsin	Protein	Asam amino
		DNAase	DNA	Nukleotida
		RNAase	RNA	Nukleotida

Pada 235alfo di atas dapat dilihat enzim-enzim yang terlibat dalam proses pencernaan dan peran atau tugas apa yang diemban oleh enzim-enzim tersebut dalam proses pencernaan.

Bahan makanan yang mengalami pencernaan kimiawi di mulut adalah zat tepung yang disebut amilum. Enzim yang berperan memecah dan mengkonversi molekul zat tepung disebut enzim altose. Enzim altose mengubah amilum menjadi zat gula yang disebut altose.

Pada lambung dihasilkan enzim dan asam lambung. Enzim-enzim dalam lambung antara lain pepsin dan rennin. Enzim pepsin berasal dari pepsinogen yang telah diubah oleh

asam lambung. Pepsin berfungsi mengubah protein menjadi pepton. Sedangkan Rennin berfungsi menggumpalkan protein yang terdapat pada susu.

Enzim-enzim yang dihasilkan dalam Pankreas diantaranya adalah enzim tripsin, amilase, dan Lipase. Enzim tripsin berfungsi merombak protein menjadi asam amino. Enzim amilase yang mengubah amilum menjadi zat gula yang disebut amilose, sedangkan enzim lipase yang mengubah lemak trigliserida menjadi asam lemak dan gliserol.

## RINGKASAN

Enzim bekerja mengkatalisis suatu reaksi dengan menurunkan energi aktivasi dari reaksi tersebut. Energi aktivasi adalah energi yang diperlukan untuk membentuk kompleks substrat-enzim yang kompeten untuk membentuk produk atau hasil reaksi.

Siklus Krebs disebut juga siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat. Jalur biokimia ini berlangsung di dalam mitokondria. Senyawa yang menjadi substrat dalam jalur ini adalah asetil KoA yang antara lain berasal dari hasil dekarboksilasi oksidatif asam piruvat.

Dengan bantuan karnitin-asilkarnitin translokase yang terdapat di amilase dalam mitokondria, asil karnitin di transportkan ke dalam matriks mitokondria. Di dalam matriks mitokondria, asil karnitin diubah kembali menjadi asil KoA oleh enzim karnitin asil transferase II yang terdapat di permukaan dalam dari membrane dalam mitokondria.

Bahan makanan yang mengalami pencernaan kimiawi di mulut adalah zat tepung yang disebut amilum. Enzim yang berperan memecah dan mengkonversi molekul zat tepung disebut enzim amilase. Enzim amilase mengubah amilum menjadi zat gula yang disebut amilose.

Pada lambung dihasilkan enzim dan asam lambung. Enzim-enzim dalam lambung antara lain pepsin dan rennin. Enzim pepsin berasal dari pepsinogen yang telah diubah oleh asam lambung. Pepsin berfungsi mengubah protein menjadi pepton. Sedangkan Rennin berfungsi menggumpalkan protein yang terdapat pada susu.

Enzim-enzim yang dihasilkan dalam Pankreas diantaranya adalah enzim tripsin, amilase, dan Lipase. Enzim tripsin berfungsi merombak protein menjadi asam amino. Enzim amilase yang mengubah amilum menjadi zat gula yang disebut amilose, sedangkan enzim lipase yang mengubah lemak trigliserida menjadi asam lemak dan gliserol.

## TES 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Enzim dalam meningkatkan kecepatan reaksi dengan cara :
  - A. Meningkatkan energi aktivasi
  - B. Menurunkan energi aktivasi
  - C. Meningkatkan energi bebas
  - D. Menurunkan energi bebas
  - E. Meningkatkan gerak Brown

- 2) Jika kofaktor enzim berikatan dengan apoenzim, maka molekul gabungan tersebut dinamakan :
- A. Substrat
  - B. Holoenzim
  - C. Active-site
  - D. Aktivator
  - E. Inhibitor
- 3) Apabila larutan enzim jenuh dengan substrat, cara paling efektif untuk terus meningkatkan produk adalah :
- A. Menambah jumlah enzim
  - B. Menambah jumlah substrat
  - C. Memanaskan larutan sampai 90°C
  - D. Menambah inhibitor allosterik
  - E. Menambah inhibitor non-kompetitif
- 4) Dalam membentuk produk atau hasil reaksi, energi aktivasi diperlukan untuk :
- A. Membentuk kompleks substrat-enzim
  - B. Membentuk kompleks ikatan kovalen
  - C. Membentuk aktivator allosterik
  - D. Membentuk kofaktor
  - E. Membentuk koenzim
- 5) Glukokinase, heksokinase, tiokinase, termasuk dalam kelompok enzim :
- A. Oksidoreduktase
  - B. Transferase
  - C. Hidrolase
  - D. Liase
  - E. Ligase
- 6) Jalur biokimia untuk Siklus Krebs berlangsung di dalam :
- A. Sel
  - B. Mitokondria
  - C. Retikulum endoplasmik
  - D. Membran plasma
  - E. Badan golgi
- 7) Senyawa yang menjadi substrat dalam jalur Siklus Krebs adalah :
- A. Asetil Ko-A
  - B. Asam lemak
  - C. Asam amino

- D. Glukosa
  - E. Alanin
- 8) Enzim tripsin berfungsi sebagai :
- A. enzim yang berfungsi mengurai pepton menjadi senyawa asam amino.
  - B. enzim yang berperan dan berfungsi mengurai altose menjadi senyawa glukosa
  - C. enzim yang berperan mengubah sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa
  - D. enzim yang berperan mengubah senyawa laktosa menjadi glukosa dan galaktosa
  - E. enzim yang berfungsi dalam mengurangi senyawa kasein dan susu
- 9) Enzim yang berfungsi menambah atau mengurangi air (H<sub>2</sub>O) dari senyawa tertentu tanpa menyebabkan terurainya senyawa yang bersangkutan adalah enzim :
- A. Enzim hidrase
  - B. Enzim altose nase
  - C. Enzim karbosilase
  - D. Enzim desmolase
  - E. Enzim katalase
- 10) Di bawah ini termasuk golongan enzim protase :
- A. Enzim galaktase
  - B. Enzim fostatase
  - C. Enzim Laktosa
  - D. Enzim Maltosa
  - E. Enzim Pektinase

## Kunci Jawaban Tes

### Tes 1

1) C

Bila aktivitas enzim diukur pada pH yang berlainan, maka sebagian besar enzim didalam tubuh akan menunjukkan aktivitas optimum antara pH 5,0 – 9,0, kecuali beberapa enzim misalnya pepsin (pH optimum = 2). Ini disebabkan oleh :

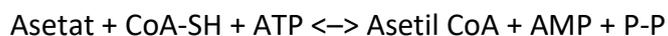
- a) Pada pH rendah atau tinggi, enzim akan mengalami denaturasi.
- b) Pada pH rendah atau tinggi, enzim maupun substrat dapat mengalami perubahan muatan listrik dengan akibat perubahan aktivitas enzim.

2) B

Perubahan suhu dan pH mempunyai pengaruh besar terhadap kerja enzim. Kecepatan reaksi enzim juga dipengaruhi oleh konsentrasi enzim dan konsentrasi substrat. Pengaruh aktivator, inhibitor, koenzim dan konsentrasi elektrolit dalam beberapa keadaan juga merupakan faktor-faktor yang penting. Hasil reaksi enzim juga dapat menghambat kecepatan reaksi.

3) B

Reaksi ligasi yaitu penggabungan 2 substrat. Reaksi ini disertai hidrolisis ATP sebagai sumber energi. Enzim ini mengkatalisis reaksi penggabungan 2 molekul dengan dibebaskannya molekul pirofosfat dari nukleosida trifosfat, sebagai contoh adalah enzim asetat-CoA-SH ligase yang mengkatalisis reaksi sebagai berikut:



4) C

- a) Esterase : enzim yang memecah ikatan ester dengan cara hidrolisis
- b) Lipase : enzim yang memecah ikatan ester pada lemak sehingga terjadi asam lemak dan gliserol.
- c) Fosfatase : enzim yang dapat memecah ikatan fosfat pada suatu senyawa.
- d) Amilase : enzim yang dapat memecah ikatan-ikatan pada amilum sehingga terbentuk maltosa.
- e) Proteolitik atau Protease atau Peptidase : enzim yang bekerja sebagai katalis dalam reaksi pemecahan molekul protein dengan cara hidrolisis.

5) B

- a) Esterase : enzim yang memecah ikatan ester dengan cara hidrolisis
- b) Lipase : enzim yang memecah ikatan ester pada lemak sehingga terjadi asam lemak dan gliserol.
- c) Fosfatase : enzim yang dapat memecah ikatan fosfat pada suatu senyawa.
- d) Amilase : enzim yang dapat memecah ikatan-ikatan pada amilum sehingga terbentuk maltosa.
- e) Proteolitik atau Protease atau Peptidase : enzim yang bekerja sebagai katalis dalam reaksi pemecahan molekul protein dengan cara hidrolisis.

- 6) A
- a) Esterase : enzim yang memecah ikatan ester dengan cara hidrolisis
  - b) Lipase : enzim yang memecah ikatan ester pada lemak sehingga terjadi asam lemak dan gliserol.
  - c) Fosfatase : enzim yang dapat memecah ikatan fosfat pada suatu senyawa.
  - d) Amilase : enzim yang dapat memecah ikatan-ikatan pada amilum sehingga terbentuk maltosa.
  - e) Proteolitik atau Protease atau Peptidase : enzim yang bekerja sebagai katalis dalam reaksi pemecahan molekul protein dengan cara hidrolisis.
- 7) B
- Enzim yang memerlukan ion logam sebagai kofaktornya dinamakan metaloenzim. Ion logam ini berfungsi untuk menjadi pusat katalis primer, menjadi tempat untuk mengikat substrat, dan sebagai stabilisator supaya enzim tetap aktif
- 8) B
- Peningkatan jumlah tripsinogen I (salah satu isozim dari tripsin) hingga empat ratus kali menunjukkan adanya pankreatitis akut
- 9) C
- Contoh penggunaan enzim sebagai reagen adalah sebagai berikut: Uricase yang berasal dari jamur *Candida utilis* dan bakteri *Arthobacter globiformis* dapat digunakan untuk mengukur asam urat.
- 10) A
- Pada teknik EMIT (Enzim Multiplied Immunochemistry Test), molekul kecil seperti obat atau hormon ditandai oleh enzim tepat di situs katalitiknya, menyebabkan antibodi tidak dapat berikatan dengan molekul (obat atau hormon) tersebut. Enzim yang lazim digunakan dalam teknik ini adalah lisozim, malat dehidrogenase, dan glukosa-6-fosfat dehidrogenase.

*Tes 2*

- 1) A
- 2) B
- 3) B
- 4) A
- 5) B
- 6) B
- 7) A
- 8) A
- 9) A
- 10) A

## Daftar Pustaka

Boyer, P.D., and Krebs, E.G. 1986. *The Enzym, Vol.17*. Academic Press.

Rohman, J.E. 1992. *Methods in Enzymology, Vol.219 : Reconstitution of Intracellular Transport*. Academic Press.

Ngili, Y. 2013. *Biokimia Dasar, edisi ke-1*. Bandung: Rekayasa Sains.

David,Page. 1985. *Prinsip-prinsip Biokimia,Edisi ke-2*. Penerbit Erlangga.

## **BAB VI VITAMIN DAN MINERAL**

*Dra. Mimin Kusmiyati, M.S*

### **PENDAHULUAN**

Tubuh membutuhkan Vitamin untuk tumbuh dan berkembang dengan normal. Ada 13 Vitamin yang dibutuhkan oleh tubuh kita. Yaitu, Vitamin A, C, D, E, K dan Vitamin B (thiamine, riboflavin, niacin, pantothenic acid, biotin, vitamin B-6, vitamin B-12 dan folate).

Vitamin bisa didapat dari makanan. Tubuh pun dapat membentuk vitamin D dan K. Namun, seseorang yang sedang menjalani diet vegetarian perlu mengonsumsi vitamin B-12 sebagai suplemen.

Setiap vitamin mempunyai fungsinya masing-masing. Bila anda kekurangan vitamin tertentu, anda bisa saja mengalami gejala penyakit tertentu. Sebagai contoh, bila anda kekurangan vitamin E, anda dapat mengalami gejala kulit kering ataupun rambut kasar. Beberapa vitamin dapat mencegah masalah kesehatan. Seperti, vitamin A yang sangat baik untuk mencegah mata rabun.

Cara terbaik untuk mendapatkan cukup vitamin adalah dengan mengonsumsi menu seimbang dengan berbagai macam makanan (karbohidrat bukan hanya dari nasi, namun jagung ataupun kentang sangat baik untuk memperkaya jenis makanan harian). Dalam kasus tertentu, anda mungkin memerlukan tambahan multivitamin untuk kesehatan yang optimal. Namun, dosis berlebihan dari beberapa vitamin pun dapat membuat anda sakit. Vitamin terbagi kedalam kelompok larut air dan larut lemak. Memiliki peranan yang penting dalam pengaturan metabolisme dan jika defisiensi akan menyebabkan penyakit.

Seperti halnya vitamin, mineral adalah nutrisi penting untuk pemeliharaan kesehatan dan pencegahan penyakit. Mineral dan vitamin bertindak secara interaksi. Anda perlu vitamin agar mineral dapat bekerja dan sebaliknya. Tanpa beberapa mineral/vitamin maka beberapa vitamin/mineral tidak berfungsi dengan baik. Perbedaan terbesar antara vitamin dan mineral adalah bahwa mineral merupakan senyawa anorganik, sedangkan vitamin organik.

Mineral dapat diklasifikasikan menurut jumlah yang dibutuhkan tubuh Anda. Mineral utama (mayor) adalah mineral yang kita perlukan lebih dari 100 mg sehari, sedangkan mineral minor (trace elements) adalah yang kita perlukan kurang dari 100 mg sehari. Kalsium, tembaga, fosfor, kalium, natrium dan klorida adalah contoh mineral utama, sedangkan kromium, magnesium, yodium, besi, fluor, mangan, selenium, dan zinc adalah contoh mineral minor. Perbedaan jenis mineral tersebut semata-mata hanya berdasarkan jumlah yang diperlukan, bukan kepentingan. Mineral minor tak kalah penting dibandingkan mineral utama. Kekurangan mineral minor akan menyebabkan masalah kesehatan yang juga serius.

Bab 6 ini akan membahas tentang vitamin dan mineral. Secara rinci, pokok bahasan yang didiskusikan meliputi klasifikasi dan tata nama, sumber dan kegunaan, struktur, fungsi vitamin dan mineral dalam proses pengaturan metabolisme. Setelah mempelajari materi dalam modul ini secara seksama, Anda diharapkan akan dapat menjelaskan vitamin dan mineral serta fungsinya dalam proses metabolisme. Setelah mempelajari bab 6 ini anda diharapkan dapat mencapai kemampuan sebagai berikut :

1. Menyebutkan sumber dan klasifikasi vitamin dan mineral
2. Menjelaskan struktur dan tata nama vitamin dan mineral
3. Menjelaskan fungsi dan peran vitamin dan mineral dalam proses metabolisme.

Dalam mempelajari materi tentang vitamin dan mineral, ada baiknya Anda menguasai terlebih dahulu kimia organik, karena.

# Topik 1

## Vitamin

Vitamin memegang peran penting dalam pemenuhan kebutuhan tubuh makhluk hidup. Vitamin yang larut lemak memiliki struktur kimia yang berbeda satu sama lain tetapi memiliki kesamaan yaitu sukar larut dalam air tetapi mudah larut dalam pelarut organik. Defisiensi atau kekurangan vitamin menyebabkan penyakit atau kelainan sehingga perlu pemenuhan sesuai dengan kebutuhan tubuh makhluk hidup.

Vitamin merupakan nutrisi organik yang dibutuhkan dalam jumlah kecil untuk berbagai fungsi biokimiawi dan yang umumnya tidak disintesis oleh tubuh sehingga harus dipasok dari makanan. Vitamin yang pertama kali ditemukan adalah vitamin A dan B, dan ternyata masing-masing larut dalam lemak dan larut dalam air. Kemudian ditemukan lagi vitamin-vitamin yang lain yang juga bersifat larut dalam lemak atau larut dalam air. Sifat larut dalam lemak atau larut dalam air dipakai sebagai dasar klasifikasi vitamin. Vitamin yang larut dalam air seluruhnya diberi simbol anggota B kompleks (kecuali vitamin C) dan vitamin larut dalam lemak yang baru ditemukan diberi simbol menurut abjad (vitamin A, D, E, K). Vitamin yang larut dalam air tidak pernah dalam keadaan toksisitas di dalam tubuh karena kelebihan vitamin ini akan dikeluarkan melalui urin.

### A. VITAMIN YANG LARUT DI DALAM AIR

#### 1. Fungsinya dalam biomedis.

Tidak adanya vitamin atau defisiensi relatif vitamin dalam diet akan menimbulkan berbagai keadaan defisiensi dan penyakit yang khas. Defisiensi vitamin tunggal dari kelompok B kompleks jarang terjadi, karena diet yang jelek paling sering disertai dengan keadaan defisiensi multiple. Diantara vitamin-vitamin yang larut dalam air, dikenali keadaan defisiensi berikut ini :

- Penyakit beri-beri (defisiensi tiamin).
- Keilosis, glositis, seborrhea, dan fotofobia (defisiensi riboflavin)
- Pellagra (defisiensi niasin).
- Neuritis perifer (defisiensi piridoksin).
- Anemia megaloblastik, asiduria metilmalonat dan anemia pernisiiosa (defisiensi kobalamin).
- Anemia megaloblastik (defisiensi asam folat).
- Penyakit skorbut/skurvi (defisiensi asam askorbat).

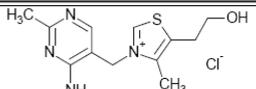
Defisiensi vitamin dihindari dengan mengkonsumsi berbagai jenis makanan dalam jumlah yang memadai.

Vitamin yang larut di dalam air kelompok dari vitamin B kompleks merupakan kofaktor dalam berbagai reaksi enzimatik yang terdapat di dalam tubuh kita. Vitamin B yang penting bagi nutrisi manusia adalah :

- Tiamin ( vitamin B 1 ).
- Riboflavin ( vitamin B2 ).
- Niasin (asam nikotinat, nikotinamida, vitamin B3 ).
- Asam pantotenat ( vitamin B5 ).
- Vitamin B6 (piridoksin, pridoksal, piridoksamin).
- Biotin.
- Vitamin B12 (kobalamin ).
- Asam folat.

Karena kelarutannya dalam air ,kelebihan vitamin ini akan diekskresikan ke dalam urin dan dengan demikian jarang tertimbun dalam konsentrasi yang toksik.Penyimpanan vitamin B kompleks bersifat terbatas (kecuali kobalamin) sebagai akibatnya vitamin B kompleks harus dikonsumsi secara teratur.

a. *Tiamin*

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B1 (Thiamine Chloride)	C <sub>12</sub> H <sub>17</sub> ClN <sub>4</sub> OS	300,8076	

Tiamin tersusun dari pirimidin tersubsitisi yang dihubungkan oleh jembatan metilen dengan tiazol tersubsitisi.

Bentuk aktif dari tiamin adalah **Tiamin Difosfat**, di mana reaksi konversi tiamin menjadi tiamin difosfat tergantung oleh enzim tiamin difosfotransferase dan ATP yang terdapat di dalam otak dan hati. Tiamin difosfat berfungsi sebagai koenzim dalam sejumlah reaksi enzimatik dengan mengalihkan unit aldehyd yang telah diaktifkan yaitu pada reaksi :

- 1) Dekarboksilasi oksidatif asam-asam α - keto ( misalnya α- ketoglutarat, piruvat, dan analog α - keto dari leusin isoleusin serta valin).
- 2) Reaksi transketolase (misalnya dalam lintasan pentosa fosfat).

Semua reaksi ini dihambat pada defisiensi tiamin. Dalam setiap keadaan tiamin, difosfat menghasilkan karbon reaktif pada tiazol yang membentuk karbanion, yang kemudian ditambahkan dengan bebas kepada gugus karbonil, misalnya piruvat. Senyawa adisi kemudian mengalami dekarboksilasi dengan membebaskan CO<sub>2</sub>. Reaksi ini terjadi dalam suatu kompleks multienzim yang dikenal sebagai kompleks piruvat dehidrogenase. Dekarboksilasi oksidatif α - ketoglutarat menjadi suksinil ko-A dan CO<sub>2</sub> dikatalisis oleh suatu

kompleks enzim yang strukturnya sangat serupa dengan struktur kompleks piruvat dehidrogenase.

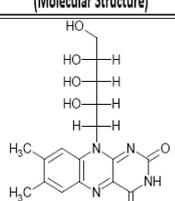
Tiamin mudah larut dalam air, sehingga didalam usus halus mudah diserap kedalam mukosa. Didalam sel epitel mukosa usus thiamin diphosphorylasikan dengan pertolongan ATP dan sebagai TPP dialirkan oleh vena portae kehati. Thiamin dieskresikan didalam urine pada keadaan normal, eskresi ini parallel terhadap tingkat konsumsi, tetapi pada kondisi defisien hubungan parallel ini tidak lagi berlaku.

▪ Defisiensi tiamin

Pada manusia yang mengalami defisiensi tiamin mengakibatkan reaksi yang tergantung pada tiamin difosfat akan dicegah atau sangat dibatasi sehingga menimbulkan penumpukan substrat untuk reaksi tersebut, misalnya piruvat , gula pento dan derivat  $\alpha$ - ketoglutarat dari asam amino rantai bercabang leusin, isoleusin serta valin. Tiamin didapati hampir pada semua tanaman dan jaringan tubuh hewan yang lazim digunakan sebagai makanan, tetapi kandungannya biasanya kecil. Biji-bijian yang tidak digiling sempurna dan daging merupakan sumber tiamin yang baik. Penyakit beri-beri disebabkan oleh diet kaya karbohidrat rendah tiamin, misalnya beras giling atau makanan yang sangat dimurnikan seperti gula pasir dan tepung terigu berwarna putih yang digunakan sebagai sumber makanan pokok.

Gejala dini defisiensi tiamin berupa neuropati perifer, keluhan mudah capai, dan anoreksia yang menimbulkan edema dan degenerasi kardiovaskuler, neurologis serta muskuler. Encefalopati Wernicke merupakan suatu keadaan yang berhubungan dengan defisiensi tiamin yangsering ditemukan di antara para peminum alkohol kronis yang mengkomsumsi hanya sedikit makanan lainnya. Ikan mentah tertentu mengandung suatu enzim (tiaminase) yang labil terhadap panas, enzim ini merusak tiamin tetapi tidak dianggap sebagai masalahyang penting dalam nutrisi manusia.

b. Riboflavin

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B2 (Riboflavin)	$C_{17}H_{23}NaO_4$	376,3639	

Riboflavin terdiri atas sebuah cincin isoaloksazin heterosiklik yang terikat dengan gula alcohol, ribitol. Jenis vitamin ini berupa pigmen fluoresen berwarna yang relatif stabil terhadap panas tetapi terurai dengan cahaya yang kasat mata.

Bentuk aktif riboflavin adalah flavin mononukleatida (FMN) dan flavin adenin dinukleotida (FAD). FMN dibentuk oleh reaksi fosforilasi riboflavin yang tergantung pada ATP

sedangkan FAD disintesis oleh reaksi selanjutnya dengan ATP dimana bagian AMP dalam ATP dialihkan kepada FMN.

FMN dan FAD berfungsi sebagai gugus prostetik enzim oksidoreduktase, di mana gugus prostetiknya terikat erat tetapi nonkovalen dengan apoproteinnya. Enzim-enzim ini dikenal sebagai flavoprotein. Banyak enzim flavoprotein mengandung satu atau lebih unsur metal seperti molibdenum serta besi sebagai kofaktor esensial dan dikenal sebagai metaloflavoprotein.

Enzim-enzim flavoprotein tersebar luas dan diwakili oleh beberapa enzim oksidoreduktase yang penting dalam metabolisme mamalia, misalnya oksidase asam  $\alpha$  amino dalam reaksi deaminasi asam amino, santonin oksidase dalam penguraian purin, aldehid dehidrogenase, gliserol 3 fosfat dehidrogenase mitokondria dalam proses pengangkutan sejumlah ekuivalen pereduksi dari sitosol ke dalam mitokondria, suksinat dehidrogenase dalam siklus asam sitrat, Asil ko A dehidrogenase, serta flavoprotein pengalih electron dalam oksidasi asam lemak dan dihidrolipoil dehidrogenase dalam reaksi dekarboksilasi oksidatif piruvat serta  $\alpha$ - ketoglutarat, NADH dehidrogenase merupakan komponen utama rantai respiratorik dalam mitokondria. Semua sistem enzim ini akan terganggu pada defisiensi riboflavin.

Dalam peranannya sebagai koenzim, flavoprotein mengalami reduksi reversible cincin isoaloksazin hingga menghasilkan bentuk FMNH<sub>2</sub> dan FADH<sub>2</sub>.

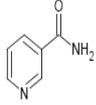
Riboflavin bebas terdapat didalam bahan makanan dan larut didalam air, sehingga mudah diserap dari rongga usus kedalam mukosa. Di dalam sel epitel mukosa usus, riboflavin bebas mengalami phosphorylasi dengan pertolongan ATP dan sebagai FMN dialirkan melalui vena portal kehati.

▪ Defisiensi Riboflavin.

Bila ditinjau dari fungsi metaboliknya yang luas, kita heran melihat defisiensi riboflavin tidak menimbulkan keadaan yang bisa membawa kematian. Namun demikian kalau terjadi defisiensi riboflavin, berbagai gejala seperti stomatitis angularis, keilosis, glositis, seborrhea dan fotofobia.

Riboflavin disintesis dalam tanaman dan mikroorganisme, namun tidak dibuat dalam tubuh mamalia. Ragi, hati dan ginjal merupakan sumber riboflavin yang baik dan vitamin ini diabsorpsi dalam intestinum lewat rangkaian reaksi fosforilasi – defosforilasi di dalam mukosa. Berbagai hormon (misalnya hormon tiroid dan ACTH), obat-obatan (misalnya klorpromazin, suatu inhibitor kompetitif) dan faktor-faktor nutrisi mempengaruhi konversi riboflavin menjadi bentuk-bentuk kofaktornya. Karena sensitivitasnya terhadap cahaya, defisiensi riboflavin dapat terjadi pada bayi yang baru lahir dengan hiperbilirubinemia yang mendapat fototerapi.

c. *Niasin*

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B3 (Niacinamide)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O	122,13	

Niasin merupakan nama generik untuk asam nikotinat dan nikotinamida yang berfungsi sebagai sumber vitamin tersebut dalam makanan. Asam nikotinat merupakan derivat asam monokarboksilat dari piridin. Bentuk aktif sari niasin adalah Nikotinamida Adenin Dinukleotida (NAD<sup>+</sup>) dan Nikotinamida Adenin Dinukleotida Fosfat (NADP<sup>+</sup>).

Nikotinat merupakan bentuk niasin yang diperlukan untuk sintesis NAD<sup>+</sup> dan NADP<sup>+</sup> oleh enzim-enzim yang terdapat pada sitosol sebagian besar sel. Karena itu, setiap nikotinamida dalam makanan, mula-mula mengalami deamidasi menjadi nikotinat. Dalam sitosol nikotinat diubah menjadi desamido NAD<sup>+</sup> melalui reaksi yang mula-mula dengan 5-fosforibosil –1-pirofosfat (PRPP) dan kemudian melalui adenilasi dengan ATP. Gugus amido pada glutamin akan turut membentuk koenzim NAD<sup>+</sup>. Koenzim ini bisa mengalami fosforilasi lebih lanjut sehingga terbentuk NADP<sup>+</sup>.

■ Fungsi Niasin

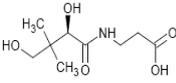
Nukleotida nikotinamida mempunyai peranan yang luas sebagai koenzim pada banyak enzim dehidrogenase yang terdapat di dalam sitosol ataupun mitokondria. Dengan demikian vitamin niasin merupakan komponen kunci pada banyak lintasan metabolik yang mengenai metabolisme karbohidrat, lipid serta asam amino. NAD<sup>+</sup> dan NADP<sup>+</sup> merupakan koenzim pada banyak enzim oksidoreduktase. Enzim-enzim dehidrogenase yang terikat dengan NAD mengkatalisis reaksi oksidoreduksi dalam lintasan oksidatif misalnya siklus asam sitrat, sedangkan enzim-enzim dehidrogenase yang terikat dengan NADP ditemukan dalam lintasan yang berhubungan dengan sintesis reduktif misalnya lintasan pentosa fosfat.

■ Defisiensi Niasin

Kekurangan niasin menimbulkan sindroma defisiensi pellagra, gejalanya mencakup penurunan BB, berbagai kelainan pencernaan, dermatitis, depresi dan demensia.

Niasin ditemukan secara luas dalam sebagian besar makanan hewani dan nabati. Asam amino esensial triptofan dapat diubah menjadi niasin (NAD<sup>+</sup>) dimana setiap 60 mg triptofan dapat dihasilkan 1 mg niasin. Terjadinya defisiensi niasin apabila kandungan makanan kurang mengandung niasin dan triptofan. Tetapi makanan dengan kandungan leusin yang tinggi dapat menimbulkan defisiensi niasin karena kadar leusin yang tinggi dalam diet dapat menghambat kuinolinat fosforibosi transferase yaitu suatu enzim kunci dalam proses konversi triptofa menjadi NAD<sup>+</sup>. Piridoksal fosfat yang merupakan bentuk aktif dari vitamin B6 juga terlibat sebagai kofaktor dalam sintesis NAD<sup>+</sup> dari triptofan. Sehingga, defisiensi vitamin B6 dapat mendorong timbulnya defisiensi niasin.

d. *Asam Pantotenat*

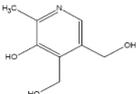
Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B5 (Pantothenic Acid)	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> NO <sub>5</sub>	436,455	

Asam pantotenat dibentuk melalui penggabungan asam pantoat dengan alanin. Asam pantotenat aktif adalah Koenzim A (Ko A) dan Protein Pembawa Asil (ACP). Asam pantoneat dapat diabsorpsi dengan mudah dalam intestinum dan selanjutnya mengalami fosforilasi oleh ATP hingga terbentuk 4'- fosfopantoneat. Penambahan sistein dan pengeluaran gugus karboksilnya mengakibatkan penambahan netto tiotanolamina sehingga menghasilkan 4' – fosfopantein, yakni gugus prostetik pada ko A dan ACP . Ko A mengandung nukleotida adenin. Dengan demikian 4' –fosfopantein akan mengalami adenilasi oleh ATP hingga terbentuk defosfo koA. Fosforilasi akhir terjadi pada ATP dengan menambahkan gugus fosfat pada gugus 3 – hidroksil dalam moitas ribose untuk menghasilkan ko A.

■ Defisiensi Asam pantoneat

Kekurangan asam pantoneat jarang terjadi karena asam pantoneat terdapat secara luas dalam makanan, khususnya dalam jumlah yang berlimpah dalam jaringan hewan, sereal utuh dan kacang-kacangan. Namun demikian, burning foot syndrom pernah terjadi diantara para tawanan perang akibat defisiensi asam pantoneat dan berhubungan dengan menurunnya kemampuan asetilasi.

e. *Vitamin B6*

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B6 (Pyridoxine)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> NO <sub>3</sub>	169,18	

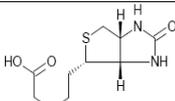
Vitamin B6 terdiri atas derivat piridin yang berhubungan erat yaitu piridoksin, piridoksal serta piridoksamin dan derivat fosfatnya yang bersesuaian.

Bentuk aktif dari vitamin B6 adalah piridoksal fosfat, di mana semua bentuk vitamin B6 diabsorpsi dari dalam intestinum, tetapi hidrolisis tertentu senyawa-senyawa ester fosfat terjadi selama proses pencernaan . Piridoksal fosfat merupakan bentuk utama yang diangkut dalam plasma. Sebagian besar jaringan mengandung piridoksal kinase yang dapat mengkatalisis reaksi fosforilasi oleh ATP terhadap bentuk vitamin yang belum terfosforilasi menjadi masing- masing derivat ester fosfatnya. Piridoksal fosfat merupakan koenzim pada beberapa enzim dalam metabolisme asam amino pada proses transaminasi, dekarboksilasi atau aktivitas aldolase. Piridoksal fosfat juga terlibat dalam proses glikogenolisis yaitu pada enzim yang memperantarai proses pemecahan glikogen.

Defisiensi Vitamin B6.

Kekurangan vitamin B6 jarang terjadi dan setiap defisiensi yang terjadi merupakan bagian dari defisiensi menyeluruh vitamin B kompleks. Namun defisiensi vitamin B6 dapat terjadi selama masa laktasi, pada alkoholik dan juga selama terapi isoniazid. Hati, ikan mackerel, alpukat, pisang, daging, sayuran dan telur merupakan sumber vitamin B6 yang terbaik.

f. Biotin

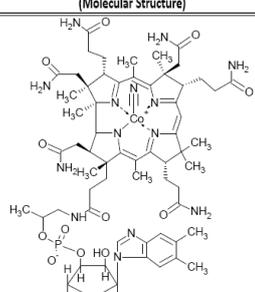
Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B7 (Vitamin H/Biotin)	$C_{10}H_{16}N_2O_6S$	244,3032	

Biotin merupakan derivat imidazol yang tersebar luas dalam berbagai makanan alami. Karena sebagian besar kebutuhan manusia akan biotin dipenuhi oleh sintesis dari bakteri intestinal, defisiensi biotin tidak disebabkan oleh defisiensi dietarik biasa tetapi oleh cacat dalam penggunaan. Biotin merupakan koenzim pada berbagai enzim karboksilase.

Defisiensi biotin

Gejala defisiensi biotin adalah depresi, halusinasi, nyeri otot dan dermatitis. Putih telur mengandung suatu protein yang labil terhadap panas yakni avidin. Protein ini akan bergabung kuat dengan biotin sehingga mencegah penyerapannya dan menimbulkan defisiensi biotin. Komsumsi telur mentah dapat menyebabkan defisiensi biotin. Tidak adanya enzim holokarboksilase sintase yang melekatkan biotin pada residu lisin apoenzim karboksilat, juga menyebabkan gejala defisiensi biotin, termasuk akumulasi substrat dari enzim-enzim yang tergantung pada biotin (piruvat karboksilase, asetyl ko A karboksilase, propionil ko A karboksilase dan  $\beta$  – metilkrotonil ko A). Pada sebagian kasus, anak-anak dengan defisiensi ini juga menderita penyakit defisiensi kekebalan.

g. Vitamin B12

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin B12 (Cyanocobalamin)	$C_{60}H_{88}CoN_{14}O_{14}P$	1355,3652	

Vitamin B12 (kobalamin) mempunyai struktur cincin yang kompleks (cincin corrin) dan serupa dengan cincin porfirin, yang pada cincin ini ditambahkan ion kobalt di bagian tengahnya. Vitamin B12 disintesis secara eksklusif oleh mikroorganismenya. Dengan demikian, vitamin B12 tidak terdapat dalam tanaman kecuali bila tanaman tersebut terkontaminasi vitamin B12 tetapi tersimpan pada binatang di dalam hati tempat vitamin B12 ditemukan dalam bentuk metilkobalamin, adenosilkobalamin, dan hidroksikobalamin.

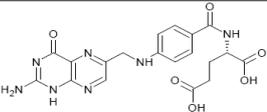
Absorpsi intestinal vitamin B12 terjadi dengan perantaraan tempat-tempat reseptor dalam ileum yang memerlukan pengikatan vitamin B12, suatu glikoprotein yang sangat spesifik yaitu faktor intrinsik yang disekresi sel-sel parietal pada mukosa lambung. Setelah diserap vitamin B12 terikat dengan protein plasma, transkobalamin II untuk pengangkutan ke dalam jaringan. Vitamin B12 disimpan dalam hati terikat dengan transkobalamin I.

Koenzim vitamin B12 yang aktif adalah metilkobalamin dan deoksiadenosilkobalamin. Metilkobalamin merupakan koenzim dalam konversi Homosistein menjadi metionin dan juga konversi Metiltetrahidrofolat menjadi tetrahidrofolat. Deoksiadenosilkobalamin adalah koenzim untuk konversi metilmalonil Ko A menjadi suksinil Ko A.

■ Defisiensi Vitamin B12

Kekurangan atau defisiensi vitamin B12 menyebabkan anemia megaloblastik, karena defisiensi vitamin B12 akan mengganggu reaksi metionin sintase. Anemia terjadi akibat terganggunya sintesis DNA yang mempengaruhi pembentukan nukleus pada eritrosit yang baru. Keadaan ini disebabkan oleh gangguan sintesis purin dan pirimidin yang terjadi akibat defisiensi tetrahidrofolat. Homosistinuria dan metilmalonat asiduria juga terjadi. Kelainan neurologik yang berhubungan dengan defisiensi vitamin B12 dapat terjadi sekunder akibat defisiensi relatif metionin.

*h. Asam Folat*

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin M (Folic Acid/Vitamin B11)	C <sub>19</sub> H <sub>19</sub> N <sub>7</sub> O <sub>6</sub>	439,3827	

Nama generiknya adalah folasin. Asam folat ini terdiri dari basa pteridin yang terikat dengan satu molekul masing-masing asam P-aminobenzoat acid (PABA) dan asam glutamat. Tetrahidrofolat merupakan bentuk asam folat yang aktif. Makanan yang mengandung asam folat akan dipecah oleh enzim-enzim usus spesifik menjadi monoglutamil folat agar bisa diabsorpsi, kemudian oleh adanya enzim folat reduktase sebagian besar derivat folat akan direduksi menjadi tetrahidrofolat dalam sel intestinal yang menggunakan NADPH sebagai donor ekuivalen pereduksi.

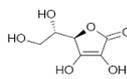
Tetrahidrofolat ini merupakan pembawa unit-unit satu karbon yang aktif dalam berbagai reaksi oksidasi yaitu metil, metilen, metenil, formil dan formimino. Semuanya bisa dikonversikan.

Serin merupakan sumber utama unit satu karbon dalam bentuk gugus metilen yang secara reversible beralih kepada tetrahidrofolat hingga terbentuk glisin dan N5, N10 – metilen – H4folat yang mempunyai peranan sentral dalam metabolisme unit satu karbon. Senyawa di atas dapat direduksi menjadi N5 – metil – H4folat yang memiliki peranan penting dalam metilasi homosistein menjadi metionin dengan melibatkan metilkobalamin sebagai kofaktor.

▪ Defisiensi Asam Folat

Defisiensi atau kekurangan asam folat dapat menyebabkan anemia megaloblastik karena terganggunya sintesis DNA dan pembentukan eritrosit.

i. Asam Askorbat

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin C (Ascorbic Acid)	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub>	176,1241	

Bentuk aktif vitamin C adalah asam askorbat itu sendiri dimana fungsinya sebagai donor ekuivalen pereduksi dalam sejumlah reaksi penting tertentu. Asam askorbat dioksidasi menjadi asam dehidroaskorbat, yang dengan sendirinya dapat bertindak sebagai sumber vitamin tersebut. Asam askorbat merupakan zat pereduksi dengan potensial hydrogen sebesar +0,008 V, sehingga membuatnya mampu untuk mereduksi senyawa-senyawa seperti oksigen molekuler, nitrat, dan sitokrom a serta c. Mekanisme kerja asam askorbat dalam banyak aktivitasnya masih belum jelas, tetapi proses di bawah ini membutuhkan asam askorbat :

- 1) Hidroksilasi prolin dalam sintesis kolagen.
- 2) Proses penguraian tirosin, oksodasi P-hidroksi –fenilpiruvat menjadi homogentisat memerlukan vitamin C yang bisa mempertahankan keadaan tereduksi pada ion tembaga yang diperlukan untuk memberikan aktivitas maksimal.
- 3) Sintesis epinefrin dari tirosin pada tahap dopamine-hidroksilase.
- 4) Pembentukan asam empedu pada tahap awal 7 alfa – hidroksilase.
- 5) Korteks adrenal mengandung sejumlah besar vitamin C yang dengan cepat akan terpakai habis kalau kelenjar tersebut dirangsang oleh hormon adrenokortikotropik.
- 6) Penyerapan besi digalakkan secara bermakna oleh adanya vitamin C.
- 7) Asam askorbat dapat bertindak sebagai antioksidan umum yang larut dalam air dan dapat menghambat pembentukan nitrosamin dalam proses pencernaan.

Vitamin C mudah diabsorpsi secara aktif dan mungkin pula secara difusi pada bagian atas usus halus lalu masuk ke peredaran darah melalui vena porta. Rata-rata absorpsi adalah 90% untuk konsumsi diantara 20 dan 129 mg sehari. Konsumsi tinggi sampai 12 gram pada

absorpsi sebanyak 16%. Vitamin C kemudian dibawa ke semua jaringan. Konsentrasi tertinggi adalah dalam jaringan adrenal, pituitari, dan retina.

▪ Defisiensi Asam Askorbat

Defisiensi atau kekurangan asam askorbat menyebabkan penyakit skorbut, penyakit ini berhubungan dengan gangguan sintesis kolagen yang diperlihatkan dalam bentuk perdarahan subkutan serta perdarahan lainnya, kelemahan otot, gusi yang bengkak dan menjadi lunak dan tanggalnya gigi, penyakit skorbut dapat disembuhkan dengan memakan buah dan sayur-sayuran yang segar. Cadangan normal vitamin C cukup untuk 34 bulan sebelum tanda-tanda penyakit skorbut muncul.

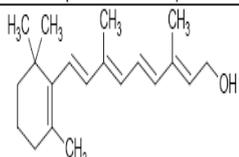
▪ Vitamin Yang Larut Di Dalam Lemak

Vitamin yang larut dalam lemak merupakan molekul hidrofobik apolar, yang semuanya adalah derivat isoprene. Molekul-molekul ini tidak disintesis tubuh dalam jumlah yang memadai sehingga harus disuplai dari makanan. Pemasokan vitamin- vitamin yang larut dalam lemak ini memerlukan absorpsi lemak yang normal agar vitamin tersebut dapat diabsorpsi secara efisien. Begitu diabsorpsi molekul vitamin tersebut harus diangkut dalam darah yaitu oleh lipoprotein atau protein pengikat yang spesifik. Vitamin yang larut di dalam lemak adalah vitamin A, D, E, dan K.

▪ Fungsi dalam biomedis

Keadaan yang mempengaruhi proses pencernaan dan penyerapan seperti steatore dan kelainan sistem biliaris dapat mempengaruhi proses penyerapan vitamin- vitamin yang larut dalam lemak, sehingga dapat menimbulkan keadaan defisiensi. Defisiensi gizi akan mempengaruhi fungsi vitamin- vitamin tersebut.

*j. Vitamin A*

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin A (Retinol)	$C_{20}H_{30}O$	286,4516	

Vitamin A atau retinal merupakan senyawa poliisoprenoid yang mengandung cincin sikloheksenil. Vitamin A merupakan istilah generik untuk semua senyawa dari sumber hewani yang memperlihatkan aktivitas biologik vitamin A. senyawa-senyawa tersebut adalah retinal dan asam retinoat dan retinol. Hanya retinol yang memiliki aktivitas penuh vitamin A, yang lainnya hanya mempunyai sebagian fungsi vitamin A.

Vitamin A mempunyai provitamin yaitu karoten. Pada sayuran vitamin A terdapat sebagai provitamin dalam bentuk pigmen berwarna kuning β karoten, yang terdiri atas dua

molekul retinal yang dihubungkan pada ujung aldehyd rantai karbonnya. Tetapi karena  $\beta$  karoten tidak mengalami metabolisme yang efisien maka  $\beta$  karoten mempunyai efektifitas sebagai sumber vitamin A hanya sepersepuluh retinal.

Ester retinal yang terlarut dalam lemak makanan akan terdispersi di dalam getah empedu dan dihidrolisis di dalam lumen intestinum diikuti oleh penyerapan langsung ke dalam epitel intestinal.  $\beta$  – Karoten yang dikonsumsi mungkin dipecah lewat reaksi oksidasi oleh enzim  $\beta$  – karoten dioksigenase. Pemecahan ini menggunakan oksigen molekuler, digalakkan dengan adanya garam-garam empedu dan menghasilkan 2 molekul retinaldehid (retinal). Demikian pula, di dalam mukosa intestinal, retinal direduksi menjadi retinol oleh enzim spesifik retinaldehid reduktase dengan menggunakan NADPH.

Retinal dalam fraksi yang kecil teroksidasi menjadi asam retinoat. Sebagian besar retinal mengalami esterifikasi dengan asam-asam lemak dan menyatu ke dalam kilomikron limfe yang masuk ke dalam aliran darah. Bentuk ini kemudian diubah menjadi fragmen kilomikron yang diambil oleh hati bersama-sama dengan kandungan retinolnya .

Di dalam hati, vitamin A disimpan dalam bentuk ester di dalam liposit, yang mungkin sebagai suatu kompleks lipoglikoprotein. Untuk pengangkutan ke jaringan, vitamin A dihidrolisis dan retinal yang terbentuk terikat dengan protein pengikat aprotinol ( RBP ). Holo- RBP yang dihasilkan diproses dalam apparatus golgi dan disekresikan ke dalam plasma. Asam retinoat diangkut dalam plasma dalam keadaan terikat dengan albumin. Begitu di dalam sel-sel ekstrahepatik, retinal terikat dengan protein pengikat retinol seluler (CRBP). Toksisitas vitamin A terjadi setelah kapasitas RBP dilampaui dan sel-sel tersebut terpapar pada retinal yang terikat.

Retinal dan retinol mengalami interkonversi dengan adanya enzim-enzim dehidrogenase atau reduktase yang memerlukan NAD atau NADP di dalam banyak jaringan. Namun demikian, begitu terbentuk dari retinal, asam retinoat tidak dapat diubah kembali menjadi retinal atau menjadi retinol. Asam retinoat dapat mendukung pertumbuhan dan differensiasi, tetapi tidak dapat menggantikan retinal dalam peranannya pada penglihatan atau pun retinol dalam dukungannya pada sistem reproduksi.

Retinol setelah diambil oleh CRBP diangkut ke dalam sel dan terikat dengan protein nucleus, di dalam nucleus inilah retinal terlibat dalam pengendalian ekspresi gen-gen tertentu, sehingga retinal bekerja menyerupai hormon steroid.

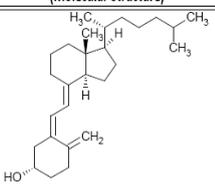
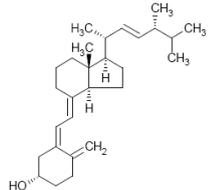
Retinal merupakan komponen pigmen visual rodopsin, yang mana rodopsin terdapat dalam sel-sel batang retina yang bertanggung jawab atas penglihatan pada saat cahaya kurang terang. 11 – cis – Retinal yaitu isomer all – transretinal, terikat secara spesifik pada protein visual opsin hingga terbentuk rodopsin. Ketika terkena cahaya, rodopsin akan terurai serta membentuk all-trans retinal dan opsin. Reaksi ini disertai dengan perubahan bentuk yang menimbulkan saluran ion kalsium dalam membran sel batang. Aliran masuk ion-ion kalsium yang cepat akan memicu impuls syaraf sehingga memungkinkan cahaya masuk ke otak

Asam retinoat turut serta dalam sintesis glikoprotein. Hal ini dapat dijelaskan bahwa asam retinoat bekerja dalam menggalakkan pertumbuhan dan differensiasi jaringan.

Retinoid dan karotenoid memiliki aktivitas antikanker. Banyak penyakit kanker pada manusia timbul dalam jaringan epitel yang tergantung pada retinoid untuk berdiferensiasi seluler yang normal.  $\beta$ -karoten merupakan zat antioksidan dan mungkin mempunyai peranan dalam menangkap radikal bebas peroksi di dalam jaringan dengan tekanan parsial oksigen yang rendah. Kemampuan  $\beta$ -karoten bertindak sebagai antioksidan disebabkan oleh stabilisasi radikal bebas peroksida di dalam struktur alkilnya yang terkonjugasi. Karena  $\beta$ -karoten efektif pada konsentrasi oksigen yang rendah, zat provitamin ini melengkapi sifat-sifat antioksidan yang dimiliki vitamin E yang efektif dengan konsentrasi oksigen yang lebih tinggi.

Kekurangan atau defisiensi vitamin A disebabkan oleh malfungsi berbagai mekanisme seluler yang di dalamnya turut berperan senyawa-senyawa retinoid. Defisiensi vitamin A terjadi gangguan kemampuan penglihatan pada senja hari (buta senja). Ini terjadi karena ketika simpanan vitamin A dalam hati hampir habis. Deplesi selanjutnya menimbulkan keratinisasi jaringan epitel mata, paru-paru, traktus gastrointestinal dan genitourinarius, yang ditambah lagi dengan pengurangan sekresi mucus. Kerusakan jaringan mata, yaitu serofthalmia akan menimbulkan kebutaan. Defisiensi vitamin A terjadi terutama dengan dasar diet yang jelek dengan kekurangan konsumsi sayuran, buah yang menjadi sumber provitamin A.

k. *Vitamin D*

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin D3 (Cholecalciferol)	$C_{27}H_{44}O$	384.6377	
Vitamin D2	$C_{28}H_{44}O$	386.6484	

Vitamin D merupakan prohormon steroid. Vitamin ini diwakili oleh sekelompok senyawa steroid yang terutama terdapat pada hewan, tetapi juga terdapat dalam tanaman serta ragi. Melalui berbagai proses metabolik, vitamin D dapat menghasilkan suatu hormon yaitu Kalsitriol, yang mempunyai peranan sentral dalam metabolisme kalsium dan fosfat.

Vitamin D dihasilkan dari provitamin ergosterol dan 7-dehidrokolesterol. Ergosterol terdapat dalam tanaman dan 7-dehidrokolesterol dalam tubuh hewan. Ergokalsiferol (vitamin D2) terbentuk dalam tanaman, sedangkan di dalam tubuh hewan akan terbentuk kolekalsiferol (vitamin D3) pada kulit yang terpapar cahaya. Kedua bentuk vitamin tersebut

mempunyai potensi yang sama, yaitu masing-masing dapat menghasilkan kalsitriol D<sub>2</sub> dan D<sub>3</sub>.

Vitamin D<sub>3</sub> ataupun D<sub>2</sub> dari makanan diekstraksi dari dalam darah (dalam keadaan terikat dengan globulin spesifik), setelah absorpsi dari misel dalam intestinum. Vitamin tersebut mengalami hidroksilasi pada posisi –25 oleh enzim vitamin D<sub>3</sub> – 25 hidroksikolekalsiferol, yaitu suatu enzim pada retikulum endoplasmic yang dianggap membatasi kecepatan reaksi. 25- hidroksi D<sub>3</sub> merupakan bentuk utama vitamin D dalam sirkulasi darah dan bentuk cadangan yang utama dalam hati.

Dalam tubulus ginjal, tulang dan plasenta, 25–hidroksiD<sub>3</sub> selanjutnya mengalami hidroksilasi dalam posisi 1 oleh enzim 25–hidroksiD<sub>3</sub> 1- hidroksilase, yakni suatu enzim mitokondria. Hasilnya adalah 1,25–dihidroksi D<sub>3</sub> ( kalsitriol ), yaitu metabolit vitamin D yang paling poten. Produksi ini diatur oleh konsentrasinya sendiri, hormon paratiroid, dan fosfat dalam serum.

Defisiensi atau kekurangan vitamin D menyebabkan penyakit rakitis terdapat pada anak-anak dan osteomalasia pada orang dewasa. Kelainan disebabkan oleh pelunakan tulang yang terjadi akibat kekurangan kalsium dan fosfat. Ikan berlemak, kuning telur dan hati merupakan sumber vitamin D yang baik.

- Absorsi, transportasi, dan penyimpanan

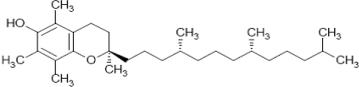
Vitamin D diabsorsi dalam usus halus bersama lipida dengan bantuan cairan empedu. Vitamin D dari bagian atas usus halus diangkut oleh D-plasma binding protein (DBP) ke tempat-tempat penyimpanan di hati, kulit, otak, tulang, dan jaringan lain. Absorsi vitamin D dan pada orang tua kurang efisien bila kandungan kalsium makanan rendah. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh gangguan ginjal dalam metabolisme vitamin D.

- Metabolisme

Vitamin D<sub>3</sub> (kolekalsiferol) dibentuk didalam kulit sinar ultraviolet dari 7-dehidrokolesterol. Vitamin D<sub>3</sub> didalam hati diubah menjadi bentuk aktif 25-hidroksi kolekalsiferol {25(OH)D<sub>3</sub>} yang lima kali lebih aktif dari pada vitamin D<sub>3</sub>. Bentuk {25(OH)D<sub>3</sub>} adalah bentuk vitamin D yang banyak di dalam darah dan banyaknya bergantung konsumsi dan penyingkapan tubuh terhadap matahari. Bentuk paling aktif adalah kalsitriol atau 1,25-dihidroksi kolekalsiferol {1,25(OH)<sub>2</sub>D<sub>3</sub>} yang 10 kali lebih aktif dari vitamin D<sub>3</sub>. Bentuk aktif ini dibuat oleh ginjal. Kalsitriol pada usus halus meningkatkan absorpsi kalsium dan fosfor dan pada tulang meningkatkan mobilisasinya.

Sintesis kalsitriol diatur oleh taraf kalsium dan fosfor didalam serum. Hormon paratiroid (PTH) yang dikeluarkan bila kalsium dalam serum rendah, tampaknya merupakan perantara yang merangsang produksi {1,25(OH)<sub>2</sub>D<sub>3</sub>} oleh ginjal. Jadi, taraf konsumsi kalsium yang rendah tercermin dalam taraf kalsium serum yang rendah. Hal ini akan mempengaruhi sekresi PTH dan peningkatan sintesis kalsitriol oleh ginjal. Taraf fosfat dari makanan mempunyai pengaruh yang sama, tetapi tidak membutuhkan PTH.

I. Vitamin E ( Tokoferol )

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin E (Alpha-Tocopherol)	$C_{55}H_{98}O_2$	430,7061	

Ada beberapa jenis tokoferol dalam bentuk alami. Semuanya merupakan 6-hidroksikromana atau tokol yang tersubstitusi isoprenoid.

Penyerapan aktif lemak meningkatkan absorpsi vitamin E. Gangguan penyerapan lemak dapat menimbulkan defisiensi vitamin E. Vitamin E di dalam darah diangkut oleh lipoprotein, pertama-tama lewat penyatuan ke dalam kilomikron yang mendistribusikan vitamin ke jaringan yang mengandung lipoprotein lipase serta ke hati dalam fragmen sisa kilomikron, dan kedua, lewat pengeluaran dari dalam hati dalam lipoprotein berdensitas sangat rendah (VLDL). Vitamin E disimpan dalam jaringan adiposa.

Vitamin E (tokoferol) bertindak sebagai antioksidan dengan memutuskan berbagai reaksi rantai radikal bebas sebagai akibat kemampuannya untuk memindahkan hidrogen fenolat kepada radikal bebas peroksil dari asam lemak tak jenuh ganda yang telah mengalami peroksidasi. Radikal bebas fenoksi yang terbentuk kemudian bereaksi dengan radikal bebas peroksil selanjutnya. Dengan demikian  $\alpha$  – tokoferol tidak mudah terikat dalam reaksi oksidasi yang reversible, cincin kromana dan rantai samping akan teroksidasi menjadi produk non radikal bebas.

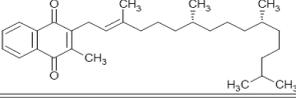
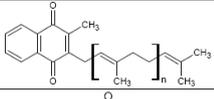
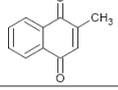
■ Absorpsi, transportasi, dan metabolisme

Sebanyak 20-80 % tokoferol diabsorpsi di bagian atas usus halus dalam bentuk misel. Absorpsi tokoferol dibantu trigliserida rantai sedang dan dihambat asam lemak rantai panjang tidak jenuh ganda. Transportasi dari mukosa usus halus ke dalam sistem limfe dilakukan oleh kilomikron untuk dibawa ke hati. Dari hati bentuk alfa-tokoferol diangkut oleh very low-density lipoprotein/VLDL masuk ke dalam plasma, sedangkan sebagian besar gamma-tokoferol dikeluarkan melalui empedu. Tokoferol di dalam plasma kemudian diterima oleh reseptor sel-sel perifer low-density lipoprotein/LDL dan masuk ke membran sel. Tokoferol menumpuk di bagian-bagian sel dimana produksi radikal bebas paling banyak terbentuk, yaitu di mitokondria dan retikulum endoplasma.

Defisiensi atau kekurangan vitamin E dapat menimbulkan anemia pada bayi yang baru lahir. Kebutuhan akan vitamin E meningkat bersamaan dengan semakin besarnya masukan lemak tak- jenuh ganda. Asupan minyak mineral, keterpaparan terhadap oksigen (seperti dalam tenda oksigen) atau berbagai penyakit yang menyebabkan tidak efisiennya penyerapan lemak akan menimbulkan defisiensi vitamin E yang menimbulkan gejala neurologi.

Vitamin E dirusak oleh pemasakan dan pengolahan makanan yang bersifat komersial, termasuk pembekuan. Benih gandum, minyak biji bunga matahari serta biji sunflower, dan minyak jagung serta kedelai, semuanya merupakan sumber vitamin E yang baik.

m. Vitamin K

Nama (Name)	Rumus Molekul (Molecular Formula)	Bobot Molekul (Molecular Weight)	Struktur Molekul (Molecular Structure)
Vitamin K1 (Phytomenadione)	$C_{41}H_{64}O_2$	450,6957	
Vitamin K2	$C_{22}H_{34}O_2$	308,4141	
Vitamin K3 (Menadiione)	$C_{11}H_{14}O_2$	172,18	

Vitamin yang tergolong ke dalam kelompok vitamin K adalah naftokuinon tersubsitusi – poliisoprenoid. Menadion (K3), yaitu senyawa induk seri vitamin K, tidak ditemukan dalam bentuk alami tetapi jika diberikan, secara in vivo senyawa ini akan mengalami alkilasi menjadi salah satu menakuinon (K2). Filokuinon (K1) merupakan bentuk utama vitamin K yang ada dalam tanaman. Menakuinon – 7 merupakan salah satu dari rangkaian bentuk tak jenuh polirenoid dari vitamin K yang ditemukan dalam jaringan binatang dan disintesis oleh bakteri dalam intestinum.

Penyerapan vitamin K memerlukan penyerapan lemak yang normal. Malabsorpsi lemak merupakan penyebab paling sering timbulnya defisiensi vitamin K. Derivat vitamin K dalam bentuk alami hanya diserap bila ada garam-garam empedu, seperti lipid lainnya, dan didistribusikan dalam aliran darah lewat sistem limfatik dalam kilomikron. Menadion, yang larut dalam air, diserap bahkan dalam keadaan tanpa adanya garam-garam empedu, dengan melintas langsung ke dalam vena porta hati.

Vitamin K ternyata terlibat dalam pemeliharaan kadar normal faktor pembekuan darah II, VII, IX dan X, yang semuanya disintesis di dalam hati mula-mula sebagai precursor inaktif.

Vitamin K bekerja sebagai kofaktor enzim karboksilase yang membentuk residu  $\gamma$  – karboksiglutamat dalam protein precursor. Reaksi karboksilase yang tergantung vitamin K terjadi dalam retikulum endoplasmic banyak jaringan dan memerlukan oksigen molekuler, karbondioksida serta hidrokuinon (tereduksi) vitamin K dan di dalam siklus ini, produk 2,3 epoksida dari reaksi karboksilase diubah oleh enzim 2,3 epoksida reduktase menjadi bentuk kuinon vitamin K dengan menggunakan zat pereduksi ditiol yang masih belum teridentifikasi. Reduksi selanjutnya bentuk kuinon menjadi hidrokuinon oleh NADH melengkapi siklus vitamin K untuk menghasilkan kembali bentuk aktif vitamin tersebut.

Vitamin K tidak dapat disintesa oleh tubuh, tetapi suplai vitamin K bagi tubuh berasal dari bahan makanan dan dari sintesa oleh microflora usus yang menghasilkan menaquinone. Untuk penyerapan vitamin K diperlukan garam empedu dan lemak didalam hidangan. Garam empedu dan lemak dicerna membentuk misel (misell) yang berfungsi sebagai transport carrier bagi vitamin K tersebut.

Defisiensi atau kekurangan vitamin K dapat menyebabkan terjadinya penyakit hemoragik pada bayi baru lahir. Hal ini disebabkan karena plasenta tidak meneruskan vitamin K secara efisien.

Vitamin K tersebar luas dalam jaringan tanaman dan hewan yang digunakan sebagai bahan makanan dan produksi vitamin K oleh mikroflora intestinal pada hakekatnya menjamin tidak terjadinya defisiensi vitamin K.

Defisiensi vitamin K dapat terjadi oleh malabsorpsi lemak yang mungkin menyertai disfungsi pankreas, penyakit biliaris, atrofi mukosa intestinal atau penyebab steatore lainnya. Di samping itu, sterilisasi usus besar oleh antibiotik juga dapat mengakibatkan defisiensi vitamin K.

## LATIHAN

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

- 1) Sebutkan vitamin larut air dan vitamin larut lemak !
- 2) Jelaskan apa yang terjadi jika seseorang mengalami defisiensi Vitamin C !
- 3) Sebutkan senyawa aktif dari Vitamin A, B1, B6 dan B12 !

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) a. VITAMIN LARUT AIR
  - Tiamin ( vitamin B 1 ).
  - Riboflavin ( vitamin B2 ).
  - Niasin (asam nikotinat ,nikotinamida, vitamin B3 )
  - Asam pantotenat ( vitamin B5 ).
  - Vitamin B6 ( piridoksin ,pidoksal ,piridoksamin ).
  - Biotin.
  - Vitamin B12 (kobalamin ).
  - Asam folat.
- b) VITAMIN LARUT LEMAK
  - Vitamin A
  - Vitamin D
  - Vitamin E
  - Vitamin K
- 2) Defisiensi atau kekurangan asam askorbat menyebabkan penyakit skorbut, penyakit ini berhubungan dengan gangguan sintesis kolagen yang diperlihatkan dalam bentuk perdarahan subkutan serta perdarahan lainnya , kelemahan otot, gusi yang bengkak dan menjadi lunak dan tanggalnya gigi, penyakit skorbut dapat disembuhkan dengan

memakan buah dan sayur-sayuran yang segar. Cadangan normal vitamin C cukup untuk 34 bulan sebelum tanda-tanda penyakit skorbut muncul.

- 3) Senyawa aktif vitamin A adalah Retinol
- Senyawa aktif vitamin B1 adalah Tiamin difosfat
  - Senyawa aktif vitamin B6 adalah Piridoksal fosfat
  - Senyawa aktif vitamin B12 adalah metilkobalamin dan deoksiadenosilkobalamin.

## RINGKASAN

Vitamin merupakan nutrien organik yang dibutuhkan dalam jumlah kecil untuk berbagai fungsi biokimiawi dan yang umumnya tidak disintesis oleh tubuh sehingga harus dipasok dari makanan. Vitamin yang pertama kali ditemukan adalah vitamin A dan B, dan ternyata masing-masing larut dalam lemak dan larut dalam air. Kemudian, ditemukan lagi vitamin-vitamin yang lain yang juga bersifat larut dalam lemak atau larut dalam air. Sifat larut dalam lemak atau larut dalam air dipakai sebagai dasar klasifikasi vitamin. Vitamin yang larut dalam air, seluruhnya diberi simbol anggota B kompleks (kecuali vitamin C) dan vitamin larut dalam lemak yang baru ditemukan diberi simbol menurut abjad (vitamin A, D, E, K). Vitamin yang larut dalam air tidak pernah dalam keadaan toksisitas di dalam tubuh karena kelebihan vitamin ini akan dikeluarkan melalui urin.

Vitamin yang larut di dalam air kelompok dari vitamin B kompleks merupakan kofaktor dalam berbagai reaksi enzimatik yang terdapat di dalam tubuh kita. Vitamin B yang penting bagi nutrisi manusia adalah :

- Tiamin ( vitamin B 1 ).
- Riboflavin ( vitamin B2 ).
- Niasin (asam nikotinat ,nikotinamida, vitamin B3 )
- Asam pantotenat ( vitamin B5 ).
- Vitamin B6 ( piridoksin, pridoksal, piridoksamin ).
- Biotin.
- Vitamin B12 (kobalamin).
- Asam folat.

Karena kelarutannya dalam air, kelebihan vitamin ini akan diekskresikan ke dalam urin dan dengan demikian jarang tertimbun dalam konsentrasi yang toksik. Penyimpanan vitamin B kompleks bersifat terbatas (kecuali kobalamin) sebagai akibatnya vitamin B kompleks harus dikonsumsi secara teratur.

Vitamin yang larut dalam lemak merupakan molekul hidrofobik apolar, yang semuanya adalah derivat isoprene. Molekul-molekul ini tidak disintesis tubuh dalam jumlah yang memadai sehingga harus disuplai dari makanan. Pemasokan vitamin- vitamin yang larut dalam lemak ini memerlukan absorpsi lemak yang normal agar vitamin tersebut dapat

diabsorpsi secara efisien. Begitu diabsorpsi molekul vitamin tersebut harus diangkut dalam darah yaitu oleh lipoprotein atau protein pengikat yang spesifik. Vitamin yang larut di dalam lemak adalah vitamin A, D, E, dan K.

## TES 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Yang termasuk vitamin larut air adalah :
  - A. Retinol, Tokoferol, dan Kobalamin
  - B. Tokoferol, Biotin, dan Nikotinamid
  - C. Retinol, Asam Folat, dan Nikotinamid
  - D. Tokoferol, Naftokuinon, dan Ergosterol
  
- 2) Yang termasuk vitamin larut lemak adalah :
  - A. Retinol, Tokoferol, dan Kobalamin
  - B. Tokoferol, Biotin, dan Nikotinamid
  - C. Retinol, Asam Folat, dan Nikotinamid
  - D. Tokoferol, Naftokuinon, dan Ergosterol
  
- 3) Piridoksal Fosfat adalah bentuk aktif dari vitamin :
  - A. A
  - B. B1
  - C. B6
  - D. B12
  
- 4) Tetrahidrofolat adalah bentuk aktif dari :
  - A. Nikotinamid
  - B. Piridoksin
  - C. Asam Folat
  - D. Niasin
  
- 5) Vitamin A didalam hati disimpan dalam bentuk :
  - A. Kristal
  - B. Ester
  - C. Asam
  - D. Basa
  
- 6) Penyakit hemoragik pada bayi baru lahir dikarenakan kekurangan :
  - A. Vitamin A
  - B. Vitamin B Kompleks

- C. Vitamin D
  - D. Vitamin K
- 7) Penyakit anemia pada bayi lahir dikarenakan kekurangan :
- A. Vitamin A
  - B. Vitamin D
  - C. Vitamin E
  - D. Vitamin K
- 8) Defisiensi vitamin B6 dapat terjadi pada keadaan seperti dibawah ini, kecuali :
- A. Masa laktasi
  - B. Alcoholic
  - C. Terapi Isoniazid
  - D. Gangguan pencernaan
- 9) Vitamin yang bekerja sebagai kofaktor enzim karboksilase adalah :
- A. Vitamin A
  - B. Vitamin D
  - C. Vitamin E
  - D. Vitamin K
- 10) Piridoksal fosfat terlibat dalam proses :
- A. Glikogenolisis
  - B. Ion Zwitter
  - C. Siklus Urea
  - D. Deaminasi

## Topik 2 M i n e r a l

Mineral memegang peranan penting dalam pemeliharaan fungsi tubuh, baik pada tingkat sel, jaringan, organ maupun fungsi tubuh secara keseluruhan. Kalium, fosfor, dan magnesium adalah bagian dari tulang, besi dari hemoglobin dalam sel darah merah, dan iodium dari hormon tiroksin. Disamping itu mineral berperan dalam berbagai tahap metabolisme, terutama sebagai kofaktor dalam aktifitas enzim-enzim. Keseimbangan mineral di dalam cairan tubuh diperlukan untuk pengaturan pekerjaan enzim-enzim, pemeliharaan keseimbangan asam basa, membantu transfer ikatan-ikatan penting melalui membran sel dan pemeliharaan kepekaan otot dan saraf terhadap rangsangan.

Sekitar 4% dari tubuh kita terdiri atas mineral, yang ada dalam analisa bahan makanan tertinggal sebagai kadar abu, yaitu sisa yang tertinggal bila suatu sampel bahan makanan dibakar sempurna di dalam suatu tungku. Kadar abu menggambarkan banyaknya mineral yang tidak terbakar menjadi zat yang dapat menguap. Mineral digolongkan ke dalam mineral makro dan mineral mikro. Mineral makro adalah mineral yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah 100 mg sehari, sedangkan mineral mikro dibutuhkan kurang dari 100 mg sehari. Jumlah mineral mikro dalam tubuh kurang dari 15 mg. Hingga saat ini dikenal sebanyak 24 mineral yang dianggap esensial. Jumlah itu setiap waktu bisa bertambah.

Mineral dapat dikelompokkan menjadi dua macam kelompok besar mineral (elemen/unsur) yang terdapat dalam tubuh kita, berdasarkan kuantumnya, ialah :

1. **Makro elemen**, yaitu terdapat dalam kuantum yang relative besar, seperti K, Na, Ca, Mg, dan P, S, serta Cl.
2. **Mikro elemen**, yang terdapat dalam kuantum yang relatif sedikit. Mikro elemen dapat dikelompokkan lagi menurut kegunaannya di dalam tubuh :
  - a. Mikro elemen esensial, yaitu yang betul-betul diperlukan oleh tubuh jadi harus ada seperti Fe, Cu, Co, Se, Zn, dan J, serta F.
  - b. Mikro elemen yang mungkin esensial, belum pasti betul diperlukan atau tidak dalam struktur atau fisiologi tubuh, seperti Cr, Mo.
  - c. Mikro elemen yang tidak diperlukan, atau non-esensial. Jenis ini terdapat di dalam tubuh karena terbawa tidak sengaja bersama bahan makanan. Jadi sebagai kontaminan (pencemar) termasuk ke dalam kelompok ini adalah Al, As, Ba, Bo, Pb, Cd, dsb.
  - d. Ada lagi kelompok yang disebut trace elements, yang sebenarnya sudah termasuk kelompok mikro elemen, tetapi diperlukan dalam kuantum yang lebih kecil lagi, dalam kelas ini termasuk Co, Cu dan Zn.

Sifat keasaman dan kebasaan suatu bahan makanan tergantung jumlah dan jenis mineral yang dikandungnya. Bahan makanan seperti sayuran dan buah-buahan mengandung banyak mineral Na, K, Ca, Fe, dan Mg yang di dalam tubuh akan membentuk komponen bersifat basa. Oleh karena itu, bahan tersebut disebut base forming foods. Bahan serelia

mengandung Cl, P, dan S. Dalam tubuh unsur tersebut membentuk komponen yang bersifat asam sehingga bahan makanan tersebut membentuk komponen yang bersifat asam sehingga bahan makanan tersebut dikenal sebagai acid forming foods. Sulfur yang ada dalam bahan makanan biasanya dalam bentuk netral dan merupakan komponen asam amino yang mengandung sulfur.

Mineral mikro terdapat dalam jumlah sangat kecil didalam tubuh, namun mempunyai peranan esensial untuk kehidupan, kesehatan dan reproduksi. Kandungan mineral mikro dalam bahan makanan sangat tergantung pada konsentrasi mineral mikro.

Berikut ini akan dibahas mengenai **Mineral Makro**.

## **A. MINERAL MAKRO**

### **1. Natrium (Na)**

Natrium merupakan kation utama dalam cairan ekstraseluler dan 35-40 % terdapat dalam kerangka tubuh. Cairan saluran cerna, sama seperti cairan empedu dan pankreas mengandung banyak natrium.

#### ▪ *Fungsi natrium yaitu :*

- 1) Menjaga keseimbangan cairan dalam kompartemen ekstraseluler.
- 2) Mengatur tekanan osmosis yang menjaga cairan tidak keluar dari darah dan masuk ke dalam sel.
- 3) Menjaga keseimbangan asam basa dalam tubuh dengan mengimbangi zat-zat yang membentuk asam.
- 4) Berperan dalam transmisi saraf dan kontraksi otot.
- 5) Berperan dalam absorpsi glukosa dan sebagai alat angkut zat gizi lain melalui membran, terutama melalui dinding usus sebagai pompa natrium.

#### ▪ *Dampak Kekurangan dan Kelebihan*

Akibat kekurangan natrium adalah sebagai berikut:

- 1) Menyebabkan kejang, apatis dan kehilangan nafsu makan
- 2) Dapat terjadi setelah muntah, diare, keringat berlebihan, dan diet rendah natrium

Akibat kelebihan natrium dapat menimbulkan keracunan, dalam keadaan akut dapat menyebabkan edema dan hipertensi.

#### ▪ *Absorpsi dan Metabolisme*

Natrium diabsorpsi di usus halus secara aktif (membutuhkan energi), lalu dibawa oleh aliran darah ke ginjal untuk disaring kemudian dikembalikan ke aliran darah dalam jumlah cukup untuk mempertahankan taraf natrium dalam darah. Kelebihan natrium akan

dikeluarkan melalui urin yang diatur oleh hormon aldosteron yang dikeluarkan oleh kelenjar adrenal jika kadar natrium darah menurun.

## 2. Klorida (Cl)

Klor merupakan anion utama cairan ekstraseluler. Konsentrasi klor tertinggi adalah dalam cairan serebrospinal (otak dan sumsum tulang belakang), lambung dan pankreas. Klor terdapat bersamaan dengan natrium dalam garam dapur. Beberapa sayuran dan buah juga mengandung klor.

### ▪ Fungsi

- 1) Berperan dalam memelihara keseimbangan cairan dan elektrolit dalam cairan ekstraseluler.
- 2) Memelihara suasana asam dalam lambung sebagai bagian dari HCL, yang diperlukan untuk bekerjanya enzim-enzim pencernaan.
- 3) Membantu pemeliharaan keseimbangan asam dan basa bersama unsur-unsur pembentuk asam lainnya
- 4) Ion klor dapat dengan mudah keluar dari sel darah merah dan masuk ke dalam plasma darah guna membantu mengangkut karbondioksida ke paru-paru dan keluar dari tubuh.
- 5) Mengatur sistem rennin-angiotensin-aldosteron yang mengatur keseimbangan cairan tubuh.

## 3. Kalium (K)

Kalium merupakan ion yang bermuatan positif dan terdapat di dalam sel dan cairan intraseluler. Kalium berasal dari tumbuh-tumbuhan dan hewan. Sumber utama adalah makanan segar/ mentah, terutama buah, sayuran dan kacang-kacangan.

### ▪ Fungsi

- 1) Berperan dalam pemeliharaan keseimbangan cairan dan elektrolit serta keseimbangan asam dan basa bersama natrium.
- 2) Bersama kalsium, kalium berperan dalam transmisi saraf dan kontraksi otot.
- 3) Di dalam sel, kalium berfungsi sebagai katalisator dalam banyak reaksi biologik, terutama metabolisme energi dan sintesis glikogen dan protein.
- 4) Berperan dalam pertumbuhan sel

## 4. Kalsium (Ca)

Kalsium merupakan mineral yang paling banyak dalam tubuh yang berada dalam jaringan keras yaitu tulang dan gigi. Di dalam cairan ekstraseluler dan intraseluler, kalsium berperan penting dalam mengatur fungsi sel, seperti untuk transmisi saraf, kontraksi otot, penggumpalan darah dan menjaga permeabilitas membran sel. Kalsium mengatur kerja hormon dan faktor pertumbuhan.

Sumber kalsium terutama pada susu dan hasil produknya, seperti keju. Ikan dimakan dengan tulang, termasuk ikan kering merupakan sumber kalsium yang baik, udang, kerang, kepiting, kacang-kacangan, dan hasil olahannya, daun singkong, daun lamtoro.

▪ *Fungsi*

- 1) Pembentukan tulang dan gigi
- 2) Kalsium dalam tulang berguna sebagai bagian integral dari struktur tulang dan sebagai tempat menyimpan kalsium.
- 3) Mengatur pembekuan darah
- 4) Katalisator reaksi biologik, seperti absorpsi vitamin B12, tindakan enzim pemecah lemak, lipase pankreas, eksresi insulin oleh pankreas, pembentukan dan pemecahan asetilkolin.
- 5) Relaksasi dan Kontraksi otot, dengan interaksi protein yaitu aktin dan myosin.
- 6) Berperan dalam fungsi saraf, tekanan darah dan fungsi kekebalan.
- 7) Meningkatkan fungsi transport membran sel, stabilisator membran, dan transmisi ion melalui membran organel sel.

**5. Fosfor (P)**

Fosfor merupakan mineral kedua terbanyak dalam tubuh, sekitar 1 % dari berat badan. Fosfor terdapat pada tulang dan gigi serta dalam sel yaitu otot dan cairan ekstraseluler. Fosfor merupakan bagian dari asam nukleat DNA dan RNA. Sebagai fosfolipid, fosfor merupakan komponen structural dinding sel. Sebagai fosfat organik, fosfor berperan dalam reaksi yang berkaitan dengan penyimpanan atau pelepasan energi dalam bentuk Adenin Trifosfat (ATP).

Fosfor terdapat pada semua sel makhluk hidup, terutama makanan kaya protein, seperti daging, ayam, ikan, telur, susu dan hasilnya, kacang-kacangan serta sereal.

▪ *Fungsi*

- 1) Kalsifikasi tulang dan gigi melalui pengendapan fosfor pada matriks tulang
- 2) Mengatur peralihan energi pada metabolisme karbohidrat, protein dan lemak melalui proses fosforilasi fosfor dengan mengaktifkan berbagai enzim dan vitamin B.
- 3) Absorpsi dan transportasi zat gizi serta sistem buffer
- 4) Bagian dari ikatan tubuh esensial yaitu RNA dan DNA serta ATP dan fosfolipid.
- 5) Mengatur keseimbangan asam basa.

**6. Magnesium (Mg)**

Magnesium adalah kation terbanyak setelah natrium di dalam cairan interstitial. Magnesium merupakan bagian dari klorofil daun. Peranan magnesium dalam pertumbuhan sama dengan peranan zat besi dalam ikatan hemoglobin dalam darah manusia yaitu untuk pernafasan. Magnesium terlibat dalam berbagai proses metabolisme.

Magnesium terdapat dalam tulang dan gigi, otot, jaringan lunak dan cairan tubuh lainnya. Sumber utama magnesium adalah sayur hijau, sereal tumbuk, biji-bijian dan kacang-kacangan. Daging, susu dan hasilnya serta coklat merupakan sumber magnesium yang baik.

▪ *Fungsi*

Magnesium berperan penting dalam sistem enzim dalam tubuh. Magnesium berperan sebagai katalisator dalam reaksi biologik termasuk metabolisme energi, karbohidrat, lipid, protein dan asam nukleat, serta dalam sintesis, degradasi, dan stabilitas bahan gen DNA di dalam semua sel jaringan lunak.

Di dalam sel ekstraselular, magnesium berperan dalam transmisi saraf, kontraksi otot dan pembekuan darah. Dalam hal ini magnesium berlawanan dengan kalsium. Magnesium mencegah kerusakan gigi dengan cara menahan kalsium dalam email gigi.

## 7. Sulfur (S)

Sulfur merupakan bagian dari zat-zat gizi esensial, seperti vitamin tiamin dan biotin serta asam amino metionin dan sistein. Rantai samping molekul sistein yang mengandung sulfur berkaitan satu sama lain sehingga membentuk jembatan disulfide yang berperan dalam menstabilkan molekul protein.

Sulfur terdapat dalam tulang rawan, kulit, rambut dan kuku yang banyak mengandung jaringan ikat yang bersifat kaku. Sumber sulfur adalah makanan yang mengandung berprotein.

▪ *Fungsi Sulfur*

Sulfur berasal dari makanan yang terikat pada asam amino yang mengandung sulfur yang diperlukan untuk sintesis zat-zat penting. Berperan dalam reaksi oksidasi-reduksi, bagian dari tiamin, biotin dan hormon insulin serta membantu detoksifikasi. Sulfur juga berperan melarutkan sisa metabolisme sehingga bisa dikeluarkan melalui urin, dalam bentuk teroksidasi dan dihubungkan dengan mukopolisakarida.

Berikut ini yang termasuk **Mineral Mikro** yaitu :

## B. MINERAL MIKRO

### 1. Besi ( Fe )

Besi merupakan mineral mikro yang paling banyak terdapat didalam tubuh manusia dewasa dan hewan yaitu sebanyak 3-5 gr didalam tubuh manusia dewasa. Sumber besi yang baik adalah makanan hewani, seperti daging, ayam dan ikan. Sumber besi baik lainnya adalah telur, sereal tumbuk, kacang-kacangan, sayuran hijau dan beberapa jenis buah. Pada umumnya besi didalam daging, ayam dan ikan mempunyai ketersediaan biologik tinggi, besi didalam sereal dan kacang kacang mempunyai ketersediaan biologik sedang, dan

besi didalam sebagian besar sayuran, terutama yang mengandung asam oksalat tinggi, seperti bayam, mempunyai ketersediaan biologik rendah.

▪ *Fungsi*

Besi berperan dalam proses respirasi sel, yaitu sebagai kofaktor bagi enzim – enzim yang terlibat didalam reaksi oksidasi reduksi. Metabolisme energi, didalam tiap sel, besi bekerja sama dengan rantai protein–pengangkut- electron, yang berperan dalam langkah–langkah akhir metabolisme energi. Sebanyak lebih dari 80 % besi yang ada dalam tubuh berada dalam hemoglobin.

## 2. Seng (Zn)

Sumber seng paling baik adalah sumber protein hewani, terutama daging, hati, kerang, biji-bijian(lengkap), serelia, leguminosa dan telur. Serelia tumbuk dan kacang-kacangan merupakan sumber seng terbaik namun ketersediaannya biologiknya rendah.

▪ *Fungsi*

Zn memegang peranan esensial dalam banyak fungsi tubuh, yaitu :

- 1) Sebagai bagian dari enzim atau sebagai kofaktor pada kegiatan lebih dari 200 enzim.
- 2) Berperan dalam berbagai aspek metabolisme seperti reaksi yang berkaitan dengan sintesis dan degradasi karbohidrat, protein, lipida, dan asam nukleat.
- 3) Berperan dalam pemeliharaan keseimbangan asam basa.
- 4) Bagian integral enzim DNA polymerase dan RNA polymerase yang diperlukan dalam sintesis DNA dan RNA.
- 5) Berperan dalam pembentukan kulit, metabolisme jaringan ikat dan penyembuhan luka.
- 6) Berperan dalam pengembangan fungsi reproduksi laki-laki dan pembentukan sperma.
- 7) Berperan dalam kekebalan yaitu, dalam sel T dan pembentukan antibodi oleh sel B.

## 3. Tembaga (Cu)

Tembaga terdapat banyak didalam makanan. Sumber utama tembaga adalah tiram, kerang, hati, ginjal, kacang-kacangan, unggas, biji-bijian, serelia, dan coklat. Air juga mengandung tembaga dan jumlahnya bergantung pada jenis pipa yang digunakan sebagai sumber air.

▪ *Fungsi (Cu)*

- 1) Fungsi utama Cu adalah sebagai bagian dari enzim. Enzim-enzim yang mengandung tembaga mempunyai berbagai macam peranan yang berkaitan dengan reaksi yang menggunakan oksigen atau radikal oksigen.

- 2) Berperan dalam mencegah anemia dengan cara membantu absorpsi besi, merangsang sintesis hemoglobin, melepas simpanan besi dari feritin dalam hati dan sebagai bagian dari enzim seruloplasmin.
- 3) Berperan dalam oksidasi besi bentuk fero menjadi feri.
- 4) Berperan dalam perubahan asam amino tirosin menjadi melanin, yaitu pigmen dan kulit.
- 5) Berperanan dalam pengikatan silang kolagen yang diperlukan untuk menjaga kekuatannya.

#### 4. Mangan

Mangan berkaitan dengan jumlah enzim dalam beberapa proses metabolisme, termasuk piruvatnya dan karboksilase asetil CoA dan dehidrogenase isositrat dalam siklus krebs dan mitokondria, bentuk mitokondria, dismutase super oksida yang menolong melindungi membran mitokondria

▪ *Fungsi:*

Dalam tubuh, Mn berperan sebagai katalisator dari beberapa reaksi metabolik yang penting pada protein, karbohidrat, dan lemak. Pada metabolisme protein, Mn mengaktifkan interkonversi asam amino dengan enzim spesifik seperti arginase, prolinase, dipeptidase. Pada metabolisme karbohidrat, Mn berperan aktif dalam beberapa reaksi konversi pada oksidasiglukosa dan sintesis oligosakarida. Pada metabolisme lemak, Mn berperan sebagai kofaktor dalam sintesis asam lemak rantai panjang dan kolesterol, metabolisme energi & sintesis lemak.

#### 5. Krom (Cr)

Sumber krom terbaik adalah makanan nabati. Kandungan krom dalam tanaman bergantung pada jenis tanaman, kandungan krom tanah dan musim. Sayuran mengandung 30 hingga 50 ppm, biji-bijian dan sereal utuh 30 hingga 70 ppm dan buah 20 ppm. Hasil laut dan daging merupakan sumber krom yang baik

▪ *Fungsi:*

Krom dibutuhkan dalam metabolisme karbohidrat dan lipida. Krom bekerja sama dengan pelepasan dalam memudahkan masuknya glukosa ke dalam sel-sel, dengan demikian dalam pelepasan energi, percobaan pada hewan menunjukkan bahwa kekurangan krom dapat menyebabkan gangguan toleransi terhadap glukosa, walaupun konsentrasi insulin normal. Dalam keadaan berat defisiensi krom dapat menunjukkan sindroma mirip diabetes. Krom diduga merupakan bagian dari ikatan organik faktor toleransi terhadap glukosa (glucose tolerance factor) bersama asam nikotinat dan glutathion. Toleransi terhadap glukosa tampaknya dapat diperbaiki dengan suplementasi krom. Hal ini harus dilakukan dibawah pengawasan dokter. Konsentrasi krom di dalam jaringan tubuh menurun dengan bertambahnya umur, kecuali pada jaringan paru-paru yang justru meningkat.

## 6. Selenium

Selenium berada dalam makanan dalam bentuk selenometionin dan selenosistein

### ▪ *Fungsi:*

Enzim selenium peroksidase berperan sebagai katalisator dalam pemecahan peroksida yang terbentuk di dalam tubuh menjadi ikatan yang tidak bersifat toksik. Peroksida dapat berubah menjadi radikal bebas yang dapat mengoksidasi asam lemak tidak jenuh yang ada pada membran sel, sehingga merusak membran sel tersebut. Selenium berperan serta dalam sistem enzim yang mencegah terjadinya radikal bebas dengan menurunkan konsentrasi peroksida dalam sel, sedangkan vitamin E menghalangi bekerjanya radikal bebas setelah terbentuk. Dengan demikian konsumsi selenium dalam jumlah cukup menghemat penggunaan vitamin E.

Selenium dan vitamin E melindungi membran sel dari kerusakan oksidatif, membantu reaksi oksigen dan hidrogen pada akhir rantai metabolisme, memindahkan ion melalui membran sel dan membantu sintesa immunoglobulin dan ubiquinon. Glutathion peroksidase berperan di dalam sitosol dan mitokondria sel, sedangkan vitamin E di dalam membran sel

Karena selenium mengurangi produksi radikal bebas di dalam tubuh, mineral mikro ini mempunyai potensi untuk mencegah penyakit kanker dan penyakit degeneratif lainnya. Bukti tentang hal ini belum cukup untuk menganjurkan penggunaan selenium sebagai suplemen. Enzim tergantung-selenium lain adalah glisin reduktase yang ditemukan di dalam sistem bakteri. Selenium juga merupakan bagian dari kompleks asam amino RNA.

## 7. Molibden (Mo)

Nilai molibden dalam makanan bergantung pada lingkungan di mana makanan tersebut ditanam. Sumber utama adalah susu, hati, sereal utuh, dan kacang-kacangan

### ▪ *Fungsi:*

Molibden bekerja sebagai kofaktor berbagai enzim, antara lain xantin oksidase, sukfat oksidase dan aldehyd oksidase yang mengkatalisis reaksi-reaksi oksidasi-reduksi seperti oksidasi aldehyd purin dan pirimidin serta xantin dan sulfit. Oksidasi sulfit berperan dalam pemecahan sistein dan metionin, serta mengkatalisis pembentukan sulfat dan sulfit. Absorpsi molibden sangat efektif (kurang dari 80%)

## 8. Flour (F)

Makanan sehari-hari mengandung fluor, namun sumber utama adalah air minum

### ▪ *Fungsi:*

Mineralisasi tulang dan pengerasan email gigi. Pada saat gigi dan tulang dibentuk, pertama terbentuk kristal hidroksiapatit yang terdiri atas kalsium dan fosfor. Kemudian flour akan menggantikan gugus hidroksil (OH) pada kristal tersebut dan membentuk fluorapatit. Pembentukan fluorapatit ini menjadikan gigi dan tulang tahan terhadap kerusakan. Flour diduga dapat mencegah osteoporosis (tulang keropos) pada orang dewasa dan orang tua.

Fluorodisasi air minum, masyarakat terutama anak-anak akan terlindungi dari karies gigi ini. Penambahan fluoride pada pasta gigi juga melindungi masyarakat terhadap karies gigi.

## 9. Kobalt (Co)

Mikroorganisme dapat membentuk vitamin B<sub>12</sub>. Hewan memamah biak memperoleh kobalamin melalui hubungan simbiosis dengan mikroorganisme dalam saluran cerna. Manusia tidak dapat melakukan simbiosis ini, sehingga harus memperoleh kobalamin dari makanan hewani seperti hati, ginjal, dan daging.

### ▪ Fungsi:

Kobal merupakan vitamin B<sub>12</sub> (kobalamin). Vitamin ini diperlukan untuk mematangkan sel darah merah dan menormalkan fungsi semua sel. Kobal mungkin juga berperan dalam fungsi berbagai enzim.

## LATIHAN

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

- 1) Jelaskan mengenai mineral mikro elemen dan sebutkan masing - masing contohnya !
- 2) Sebutkan minimal 3 dari fungsi Cu !
- 3) Sebutkan minimal 2 gejala penyakit jika seseorang kekurangan dan kelebihan Zn!

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) **Mikro elemen**, yang terdapat dalam kuantum yang relatif sedikit. Mikro elemen dapat dikelompokkan lagi menurut kegunaannya di dalam tubuh:
  - a) Mikro elemen esensial, yaitu yang betul-betul diperlukan oleh tubuh jadi harus ada seperti **Fe, Cu, Co, Se, Zn, dan J, serta F**.
  - b) Mikro elemen yang mungkin esensial, belum pasti betul diperlukan atau tidak dalam struktur atau fisiologi tubuh, seperti **Cr, Mo**.
  - c) Mikro elemen yang tidak diperlukan, atau nonesensial. Jenis ini terdapat di dalam tubuh karena terbawa tidak sengaja bersama bahan makanan. Jadi sebagai kontaminan (pencemar) termasuk ke dalam kelompok ini adalah **Al, As, Ba, Bo, Pb, Cd, dsb**.
  - d) Ada lagi kelompok yang disebut trace elements, yang sebenarnya sudah termasuk kelompok mikro elemen, tetapi diperlukan dalam kuantum yang lebih kecil lagi, dalam kelas ini termasuk **Co, Cu dan Zn**.
- 2) Fungsi (Cu)
  - a) Fungsi utama Cu adalah sebagai bagian dari enzim. Enzim-enzim mengandung tembaga mempunyai berbagai macam peranan yang berkaitan dengan reaksi yang menggunakan oksigen atau radikal oksigen.

- b) Tembaga berperan dalam mencegah anemia dengan cara membantu absorpsi besi, merangsang sintesis hemoglobin, melepas simpanan besi dari feritin dalam hati dan sebagai bagian dari enzim seruloplasmin.
  - c) Tembaga berperan dalam oksidasi besi bentuk fero menjadi feri.
  - d) Tembaga berperan dalam perubahan asam amino tirosin menjadi melanin, yaitu pigmen dan kulit.
  - e) Tembaga juga berperan dalam pengikatan silang kolagen yang diperlukan untuk menjaga kekuatannya.
- 3) Akibat kekurangan seng pertumbuhan badan tidak sempurna (kerdil).
- a) Gangguan dan keterlambatan pertumbuhan kematangan seksual. misalnya, pencernaan terganggu, gangguan fungsi pankreas, gangguan pembentukan kilomikron dan kerusakan permukaan saluran cerna.
  - b) Kekurangan Zn mengganggu pusat sistem saraf dan fungsi otak.
  - c) Kekurangan Zn mengganggu metabolisme dalam hal kekurangan vitamin A, gangguan kelenjar tiroid, gangguan nafsu makan serta memperlambat penyembuhan luka.
- Jika kelebihan Zn, maka akan :
- a) Kelebihan Zn hingga 2 sampai 3 kali menurunkan absorpsi tembaga.
  - b) Kelebihan sampai 10 kali mempengaruhi metabolisme kolesterol, mengubah nilai lipoprotein dan tampaknya dapat mempercepat timbulnya aterosklerosis.
  - c) Kelebihan sampai sebanyak 2 gram atau lebih dapat menyebabkan muntah, diare, demam, kelelahan, anemia, dan gangguan reproduksi.

## RINGKASAN

Mineral memegang peranan penting dalam pemeliharaan fungsi tubuh, baik pada tingkat sel, jaringan, organ maupun fungsi tubuh secara keseluruhan. Kalium, fosfor, dan magnesium adalah bagian dari tulang, besi dari hemoglobin dalam sel darah merah, dan iodium dari hormon tiroksin. Disamping itu mineral berperan dalam berbagai tahap metabolisme, terutama sebagai kofaktor dalam aktifitas enzim-enzim. Keseimbangan mineral di dalam cairan tubuh diperlukan untuk pengaturan pekerjaan enzim-enzim, pemeliharaan keseimbangan asam basa, membantu transfer ikatan-ikatan penting melalui membran sel dan pemeliharaan kepekaan otot dan saraf terhadap terhadap rangsangan.

Mineral dapat dikelompokkan menjadi dua macam kelompok besar mineral (elemen/unsur) yang terdapat dalam tubuh kita, berdasarkan kuantumnya, ialah :

- 1) Makro elemen, yaitu terdapat dalam kuantum yang relative besar, seperti K, Na, Ca, Mg, dan P, S, serta Cl.
- 2) Mikro elemen, yang terdapat dalam kuantum yang relative sedikit. Mikro elemen dapat dikelompokkan lagi menurut kegunaannya di dalam tubuh:

- a) Mikro elemen esensial, yaitu yang betul-betul diperlukan oleh tubuh jadi harus ada seperti Fe, Cu, Co, Se, Zn, dan J, serta F.
- b) Mikro elemen yang mungkin esensial, belum pasti betul diperlukan atau tidak dalam struktur atau fisiologi tubuh, seperti Cr, Mo.
- c) Mikro elemen yang tidak diperlukan, atau non-esensial. Jenis ini terdapat di dalam tubuh karena terbawa tidak sengaja bersama bahan makanan. Jadi sebagai kontaminan (pencemar) termasuk ke dalam kelompok ini adalah Al, As, Ba, Bo, Pb, Cd, dsb.
- d) Ada lagi kelompok yang disebut trace elements, yang sebenarnya sudah termasuk kelompok mikro elemen, tetapi diperlukan dalam kuantum yang lebih kecil lagi, dalam kelas ini termasuk Co, Cu dan Zn.

## TES 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Yang termasuk Makro elemen adalah...
  - A. Co, Cu dan Zn
  - B. Al, Bo dan Mg
  - C. Cd, K dan Mg
  - D. Mg, K dan Ca
- 2) Yang termasuk Mikro elemen adalah ...
  - A. Co, Cu dan Zn
  - B. Al, Bo dan Mg
  - C. Cd, K dan Mg
  - D. Mg, K dan Ca
- 3) Cu dan Zn termasuk kedalam ...
  - A. Makro elemen
  - B. Trace elemen
  - C. Mikro elemen essensial
  - D. Mikro elemen non-essensial
- 4) Konsentrasi klor tertinggi ada dalam ...
  - A. Usus halus
  - B. Limfa
  - C. Cairan serebrospinal
  - D. Air liur

- 5) Mn mengaktifkan interkonversi asam amino dengan enzim spesifik seperti dibawah ini, kecuali ...
- A. Arginase
  - B. Prolinase
  - C. Dipeptidase
  - D. Amilase
- 6) pH yang dibutuhkan kalsium agar dalam kondisi terlarut adalah ...
- A. 3
  - B. 6
  - C. 10
  - D. 12
- 7) Mineral yang berperan dalam perubahan asam amino tirosin menjadi melanin adalah...
- A. Tembaga
  - B. Mangan
  - C. Molibden
  - D. Selenium
- 8) Krom dibutuhkan dalam metabolisme ...
- A. Protein
  - B. Sel
  - C. Lipid
  - D. Enzim
- 9) Dalam keadaan akut kelebihan Natrium akan menyebabkan ...
- A. Kejang – kejang
  - B. Diare
  - C. Hipertensi
  - D. Obesitas
- 10) Kekurangan fosfor biasa terjadi karena menggunakan obat ...
- A. Antibiotik
  - B. Anti Hipertensi
  - C. Antasid
  - D. Anti diabetes

## Kunci Jawaban Tes

### Tes 1

1) C

Vitamin yang larut di dalam air kelompok dari vitamin B kompleks merupakan kofaktor dalam berbagai reaksi enzimatik yang terdapat di dalam tubuh kita. Vitamin B yang penting bagi nutrisi manusia adalah :

- Tiamin ( vitamin B 1 ).
- Riboflavin ( vitamin B2 ).
- Niasin (asam nikotinat ,nikotinamida, vitamin B3 )
- Asam pantotenat ( vitamin B5 ).
- Vitamin B6 ( piridoksin ,pidoksal ,piridoksamin ).
- Biotin.
- Vitamin B12 (kobalamin ).
- Asam folat.

2) D

Vitamin yang larut dalam lemak merupakan molekul hidrofobik apolar, yang semuanya adalah derivat isoprene. Molekul-molekul ini tidak disintesis tubuh dalam jumlah yang memadai sehingga harus disuplai dari makanan. Pemasokan vitamin- vitamin yang larut dalam lemak ini memerlukan absorpsi lemak yang normal agar vitamin tersebut dapat diabsorpsi secara efisien. Begitu diabsorpsi molekul vitamin tersebut harus diangkut dalam darah yaitu oleh lipoprotein atau protein pengikat yang spesifik. Vitamin yang larut di dalam lemak adalah vitamin A, D, E, dan K.

3) C

- Senyawa aktif vitamin A adalah Retinol
- Senyawa aktif vitamin B1 adalah Tiamin difosfat
- Senyawa aktif vitamin B6 adalah Piridoksal fosfat
- Senyawa aktif vitamin B12 adalah metilkobalamin dan deoksiadenosilkobalamin.

4) C

- Senyawa aktif Asam Folat adalah Tetrahidrofolat
- Senyawa aktif B3 adalah Nikotinamida Adenin Dinukleotida (NAD+) dan Nikotinamida Adenin Dinukleotida Fosfat ( NADP+).
- Senyawa aktif vitamin piridoksin adalah Piridoksal fosfat

5) B

Di dalam hati, vitamin A disimpan dalam bentuk ester di dalam liposit, yang mungkin sebagai suatu kompleks lipoglikoprotein.

6) D

Defisiensi atau kekurangan vitamin K dapat menyebabkan terjadinya penyakit hemoragik pada bayi baru lahir. Hal ini disebabkan karena plasenta tidak meneruskan vitamin K secara efisien.

- 7) C  
Defisiensi atau kekurangan vitamin E dapat menimbulkan anemia pada bayi yang baru lahir. Kebutuhan akan vitamin E meningkat bersamaan dengan semakin besarnya masukan lemak tak jenuh ganda.
- 8) D  
Kekurangan vitamin B6 jarang terjadi dan setiap defisiensi yang terjadi merupakan bagian dari defisiensi menyeluruh vitamin B kompleks. Namun, defisiensi vitamin B6 dapat terjadi selama masa laktasi, pada alkoholik dan juga selama terapi isoniazid.
- 9) D  
Vitamin K bekerja sebagai kofaktor enzim karboksilase yang membentuk residu  $\gamma$  – karboksiglutamat dalam protein precursor. Reaksi karboksilase yang tergantung vitamin K terjadi dalam retikulum endoplasmic banyak jaringan dan memerlukan oksigen molekuler, karbondioksida serta hidrokuinon (tereduksi) vitamin K dan di dalam siklus ini, produk 2,3 epoksida dari reaksi karboksilase diubah oleh enzim 2,3 epoksida reduktase menjadi bentuk kuinon vitamin K dengan menggunakan zat pereduksi ditiol yang masih belum teridentifikasi. Reduksi selanjutnya bentuk kuinon menjadi hidrokuinon oleh NADH melengkapi siklus vitamin K untuk menghasilkan kembali bentuk aktif vitamin tersebut
- 10) A  
Piridoksal fosfat juga terlibat dalam proses glikogenolisis yaitu pada enzim yang memperantarai proses pemecahan glikogen.

#### Tes 2

- 1) D  
Makro elemen, yaitu terdapat dalam kuantum yang relatif besar, seperti K, Na, Ca, Mg, dan P, S, serta Cl.
- 2) A  
Mikro elemen, yang terdapat dalam kuantum yang relatif sedikit. Mikro elemen dapat dikelompokkan lagi menurut kegunaannya di dalam tubuh :
- Mikro elemen esensial, yaitu yang betul-betul diperlukan oleh tubuh jadi harus ada seperti Fe, Cu, Co, Se, Zn, dan J, serta F.
  - Mikro elemen yang mungkin esensial, belum pasti betul diperlukan atau tidak dalam struktur atau fisiologi tubuh, seperti Cr, Mo.
  - Mikro elemen yang tidak diperlukan, atau non-esensial. Jenis ini terdapat di dalam tubuh karena terbawa tidak sengaja bersama bahan makanan. Jadi sebagai kontaminan (pencemar) termasuk ke dalam kelompok ini adalah Al, As, Ba, Bo, Pb, Cd, dsb.
  - Ada lagi kelompok yang disebut trace elements, yang sebenarnya sudah termasuk kelompok mikro elemen, tetapi diperlukan dalam kuantum yang lebih kecil lagi, dalam kelas ini termasuk Co, Cu dan Zn.

- 3) B  
Trace elements = yang sebenarnya sudah termasuk kelompok mikro elemen, tetapi diperlukan dalam kuantum yang lebih kecil lagi, dalam kelas ini termasuk Co, Cu dan Zn.
- 4) C  
Klor merupakan anion utama cairan ekstraselular. Konsentrasi klor tertinggi adalah dalam cairan serebrospinal (otak dan sumsum tulang belakang), lambung dan pankreas.
- 5) D  
Pada metabolisme protein, Mn mengaktifkan interkonversi asam amino dengan enzim spesifik seperti arginase, prolinase, dipeptidase. Pada metabolisme karbohidrat, Mn berperan aktif dalam beberapa reaksi konversi pada oksidasi glukosa dan sintesis oligosakarida. Pada metabolisme lemak, Mn berperan sebagai kofaktor dalam sintesis asam lemak rantai panjang dan kolesterol serta metabolisme energi & sintesis lemak.
- 6) B  
Sebanyak 30-50 % kalsium yang dikonsumsi diabsorpsi tubuh, yang terjadi di bagian atas usus halus yaitu duodenum. Kalsium membutuhkan pH 6 agar dapat berada dalam kondisi terlarut. Absorpsi kalsium terutama dilakukan secara aktif dengan menggunakan alat angkut protein-pengikat kalsium.
- 7) A  
Fungsi (Cu)
- a) Fungsi utama enzim di dalam adalah sebagai bagian dari enzim. Enzim-enzim mengandung tembaga mempunyai berbagai macam peranan yang berkaitan dengan reaksi yang menggunakan oksigen atau radikal oksigen.
  - b) Tembaga berperan dalam mencegah anemia dengan cara membantu absorpsi besi, merangsang sintesis hemoglobin, melepas simpanan besi dari ferritin dalam hati dan sebagai bagian dari enzim seruloplasmin.
  - c) Tembaga berperan dalam oksidasi besi bentuk ferro menjadi feri.
  - d) Tembaga berperan dalam perubahan asam amino tirosin menjadi melanin, yaitu pigmen dan kulit.
  - e) Tembaga juga berperan dalam pengikatan silang kolagen yang diperlukan untuk menjaga kekuatannya.
- 8) C  
Krom dibutuhkan dalam metabolisme karbohidrat dan lipida. Krom bekerja sama dengan pelepasan dalam memudahkan masuknya glukosa ke dalam sel-sel.
- 9) C  
Akibat kelebihan natrium dapat menimbulkan keracunan yang dalam keadaan akut menyebabkan edema dan hipertensi.
- 10) C  
Kekurangan fosfor biasa terjadi karena menggunakan obat antacid untuk menetralkan asam lambung, yang dapat mengikat fosfor sehingga tidak dapat diabsorpsi.

## Daftar Pustaka

Newsholme, E.A., and Leech, A.R. 1983. *Biochemistry for the Medical Science*. Wiley.

Moran LA, Horton HR, Scrimgeour KG. 2005. *Principles of Biochemistry 5 th ed*. Pearson:, New York.

Nelson DL, Cox MM, Lehninger. 2004. *Principles of Biochemistry 4 th ed*, London: WH Freeman. ,

Ngili, Y. 2013. *Biokimia Dasar, Edisi ke-1*. Penerbit Rekayasa Sains.